

FD-1229



São Paulo  
1991

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

QUALIFICAÇÃO DE PROCESSOS DE MEDIÇÃO DE FALTA DE  
CIRCULARIDADE DO CASCO RESISTENTE DE SUBMARINOS

VICENTE MARCELLO MASSAROTTI

VICENTE MARCELLO MASSAROTTI  
Eng. Mecânico, Instituto de Ensino de Engenharia Paulista, 1987

QUALIFICAÇÃO DE PROCESSOS DE MEDIÇÃO DE FALTA DE  
CIRCULARIDADE DO CASCO RESISTENTE DE SUBMARINOS

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Orientador : Prof. Dr. Miguel Angel Buelta Martínez

São Paulo  
1991

A meus pais pela  
dedicação e apoio  
durante toda minha  
vida

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Miguel A. B. Martínez, por sua constante

orientação e incentivo.

Ao Prof. Dr. Edison Gonçalves, pela amizade e incentivo

recebidos.

Ao Altmte. Elcio de Sá Freitas, incentivador desse trabalho.

Aos Eng<sup>os</sup>. Gilberto F. M. de Souza, Danilo de Paiva Sá

Freitas e Marcelo A. Vargas que executaram parte desse trabalho,

e as seguintes entidades:

A Diretoria de Engenharia Naval da Marinha do Brasil

(DEN-MB).

Ao Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro, pelo uso de suas

instalações e pessoal.

Ao CENO-USP, na pessoa de seu corpo de técnicos e

engenheiros.

A FAPESP, pelo auxílio despendido.

E a todos os demais colegas, engenheiros e técnicos, que de  
uma forma ou de outra participaram do desenvolvimento deste  
trabalho.



Este trabalho apresenta todas as etapas que foram vencidas, na qualificação de três processos de medição de falta de circularidade do casco resistente de submarinos, os quais sejam: Processo do Compasso, do Jig e da Régua em arco. Para este último, além de se melhorar o próprio instrumento de medida, um novo procedimento matemático de cálculo da falta de circularidade é elaborado.

Estes processos foram qualificados, utilizando-se um procedimento, baseado em métodos estatísticos, desenvolvido especialmente para a execução deste trabalho, que calcula a precisão da medição. Elaborou-se também, um critério de aceitação de cavernas, baseado nos resultados obtidos durante a qualificação dos processos de medição.

Deste contexto são obtidas importantes conclusões sobre a qualidade, utilidade e viabilidade do uso desses processos, ao longo de todas as fases de fabricação do casco resistente de um submarino.

## RESUMO

## ABSTRACT

This work presents all conquered stages, in a qualification of three procedures for measuring and calculation the circularity of a submarine pressure hull., which are: Compass process, Jig and the Bridge gauge transverse method. For the last, not only the measurement instrument is improved - the Bridge gauge - but it is also presented a new mathematical procedure for calculation the out-of-roundness.

This process are qualify using a qualification procedure, based in statistical methods, specially developed to perform this work, which calculate the precision for each measuring procedure. Its also propose frame acceptance criteria based on the results obtained during the qualification process.

In this context some important conclusion about the quality, utility and using of these process during all the steps of pressure hull fabrication are presented.

II.17	EFEITOS DE FALTA DE CIRCULARIDADE REAL
II.16	II.4 - MODELO ANALITICO PARA A ANALISE DOS
II.15	II.3 - CALCULO DO INICIO DO ESCOAMENTO
II.14	CASCO RESISTENTE
II.13	II.2 - EFEITOS DA FALTA DE CIRCULARIDADE DO
II.12	II.1 - INTRODUÇÃO
II.11	CAPITULO II - FALTA DE CIRCULARIDADE
II.10	I.3 - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO
II.9	I.2 - OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO
II.8	I.1 - EXPLANAÇÕES INICIAIS
II.7	CAPITULO I - INTRODUÇÃO
II.6	Definições
II.5	Lista de tabelas
II.4	Lista de figuras
II.3	Nomenclatura
II.2	Índice Geral
II.1	Abstract
I.10	Resumo
I.9	Agradecimento
I.8	Dedicatória
I.7	
I.6	
I.5	
I.4	
I.3	
I.2	
I.1	
PAG.	

INDICE GERAL



III.1	CAPÍTULO III - PROCESSOS DE MEDIÇÃO
III.1	III.1 - INTRODUÇÃO
III.2	III.2 - PROCESSO DO COMPASSO
III.2	III.2.1 - DESCRIÇÃO DO COMPASSO
III.2	III.2.2 - PROCESSO DE MEDIÇÃO COM O COMPASSO
III.2	III.2.3 - MÉTODO DE ANÁLISE DAS MEDIÇÕES
III.4	OBTIDAS COM O COMPASSO
III.9	III.3 - PROCESSO DO JIG
III.9	III.3.1 - DESCRIÇÃO DO JIG
III.9	III.3.2 - PROCESSO DE MEDIÇÃO COM O JIG
III.9	III.3.3 - MÉTODO DE ANÁLISE DAS MEDIÇÕES
III.13	OBTIDAS COM O JIG
III.17	III.4 - PROCESSO DA RÉGUA EM ARCO
III.17	III.4.1 - DESCRIÇÃO DA RÉGUA EM ARCO
III.17	III.4.2 - PROCESSO DE MEDIÇÃO COM A RÉGUA EM ARCO
III.17	III.4.3 - APERFEIÇOAMENTOS NA RÉGUA EM ARCO
III.20	ARCO
III.20	III.4.3.1 - RÉGUA EM ARCO
III.20	ANALÓGICA
III.24	III.4.3.1 - RÉGUA EM ARCO
III.24	DIGITAL
III.28	III.4.4 - MÉTODO DE ANÁLISE DAS MEDIÇÕES
III.28	OBTIDAS COM A RÉGUA EM ARCO

V.1 - INTRODUÇÃO  
 V.2 - COMPASSO  
 V.3 - JIG  
 V.4 - RÉGUA EM ARCO  
 V.4.1 - ANALÓGICA  
 V.4.2 - DIGITAL

CAPÍTULO V - RESULTADOS OBTIDOS

V.1  
 IV.1 - INTRODUÇÃO  
 IV.2 - MÉTODOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS  
 IV.2.1 - QUALIFICAÇÃO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO  
 IV.2.2 - QUALIFICAÇÃO DE OPERADORES  
 IV.3 - PROCEDIMENTOS UTILIZADOS DURANTE A QUALIFICAÇÃO  
 IV.3.1 - COMPASSO  
 IV.3.2 - JIG  
 IV.3.3 - RÉGUA EM ARCO  
 IV.3.3.1 - ANALÓGICA  
 IV.3.3.2 - DIGITAL  
 IV.3.4 - QUALIFICAÇÃO DOS OPERADORES  
 IV.4 - PROBLEMAS ENCONTRADOS DURANTE A QUALIFICAÇÃO  
 IV.4.1 - COMPASSO  
 IV.4.2 - JIG  
 IV.4.3 - RÉGUA EM ARCO  
 IV.4.3.1 - ANALÓGICA  
 IV.4.3.2 - DIGITAL

PÁG.



		AMOSTRAS PARA QUALIFICAÇÃO DE OPERADORES..
		..LISTAGENS DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE
		ANEXO 1
D.1		ARCO DIGITAL..
		CIRCULARIDADE DO PROCESSO DE QUALIFICAÇÃO DA REGUA EM
		APÊNDICE - D..PROCESSAMENTO DOS DADOS DE FALTA DE
C.1		ARCO ANALÓGICA..
		CIRCULARIDADE DO PROCESSO DE QUALIFICAÇÃO DA REGUA EM
		APÊNDICE - C..PROCESSAMENTO DOS DADOS DE FALTA DE
B.1		CIRCULARIDADE DO PROCESSO DE QUALIFICAÇÃO DO JIG..
		APÊNDICE - B..PROCESSAMENTO DOS DADOS DE FALTA DE
A.1		COMPASSO..
		CIRCULARIDADE DO PROCESSO DE QUALIFICAÇÃO DO
		APÊNDICE - A..PROCESSAMENTO DOS DADOS DE FALTA DE
		REFERÊNCIAS
VII.5		VII.3 - TRABALHOS FUTUROS
VII.2		VII.2 - CONCLUSÕES PRINCIPAIS
VII.1		VII.1 - EXPLANAÇÕES FINAIS
VII.1		CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES
VI.1		VI.2 - CASOS POSSÍVEIS PARA FALTA DE CIRCULARIDADE
VI.1		VI.1 - INTRODUÇÃO
		CAPÍTULO VI - CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DE UMA CAVERNA VI.1
	PÁG.	
VIII		

- AMRJ - Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro
- $A_r$  - Amplitude do 1-ésimo modo da decomposição da falta de circularidade
- [A] - Matriz de dados
- $B_0$  - Valor da falta de circularidade máxima
- $B_{0_{mn}}$  - Componente em cosseno da decomposição da falta de circularidade inicial
- $c$  - Distância do ponto mais afastado do flange livre das cavernas à linha neutra à flexão do perfil tomado pela caverna e a chapa colaborante
- $c'$  - Idem a  $c$  para um ponto do casco resistente
- $c$  - Corda da régua em arco
- $C$  - Credibilidade
- $C^1, C^2$  - Configurações impostas
- CENO-USP - Centro de Estruturas Navais e Oceânicas da Universidade de São Paulo
- CEPEN-USP - Centro de Estudos e Pesquisa em Engenharia Naval da Universidade de São Paulo
- $D$  - Distância entre as faltas de circularidade verdadeira e aparente
- $d_p$  - escalar
- $\hat{d}_p$  - amplitude calculada
- $\hat{d}_o$  - amplitude de um intervalo
- $D$  - Diâmetro
- $D_i$  - Distância entre a estação  $i$  e o círculo de referência das geratrizes
- $D_{0_{mn}}$  - Componente em seno da decomposição da falta de circularidade inicial
- DEN - Diretoria de Engenharia Naval
- DGM - Diretoria Geral de Material da Marinha
- $e$  - Espessura do flange de uma caverna
- $E$  - Módulo de elasticidade do material
- $F_1$  - Off-set do ponto 1

## NOMENCLATURA

- [F] - Vetor de dados
- $F^r(x, \theta)$  - Forma do r-ésimo modo da decomposição da falta de circularidade real
- GAP - Distância vertical calculada entre a estação (0) e (n)
- I - Momento de inércia da caverna, mais chapa colaborante em relação a um eixo paralelo ao eixo do submersível, passando pela linha neutra
- $L_a$  - Distância entre anteparas estruturais de um compartimento do submersível ou distância entre cavernas gigantes
- m - Tamanho da amostra
- MB - Marinha do Brasil
- $M_o$  - Momento fletor, por unidade de comprimento, que causa tensões na direção X, agente na circunferência intersecção do cilindro com outra estrutura
- n - Número de ondas circunferenciais de uma seção transversal
- OLPC - Distância horizontal calculada entre a estação (0) e (n). (Overlap)
- p - Pressão externa
- p - Chance de acerto
- P - Probabilidade
- $P_1$  - Probabilidade de acerto
- $P_2$  - Probabilidade de acerto mínimo
- $P_o, P_1, P_2, P_3$  - Estações do casco resistente
- $P_{col}$  - Pressão de colapso (à profundidade de colapso)
- $P_{cr}$  - Pressão de flambagem elástica
- $P_{crn}$  - Pressão de flambagem elástica correspondente a n ondas circunferenciais
- r - Distância do ponto onde age M até o centro
- $R'$  - Rato do novo sistema de coordenadas
- $R_i$  - Rato médio
- $R_c$  - Rato da linha neutra à flexão do perfil
- $R_o$  - Rato de referência das geratrizes cilíndricas
- $r_1$  - Rato do ponto 1



$r$	-	Raio da régua em arco
$R^*$	-	Conjunto dos reais
$R_i$	-	Raio da estação $i$ em relação ao centro das geratrizes
$R_0$	-	Raio da linha neutra ao perfil isolado
$S$	-	Somatória de uma série
$w$	-	Falta de circularidade
$[W]$	-	Matriz das faltas de circularidade
$w'$	-	Falta de circularidade $w$ , descontadas as componentes que não causam deformação no casco
$w^1$	-	Desvio radial
$w^{ad}$	-	Falta de circularidade admissível
$w^{ap}$	-	Falta de circularidade aparente
$w^{max}$	-	Falta de circularidade máxima
$w_n$	-	Falta de circularidade de um ponto $n$
$w_c, w_z$	-	Falta de circularidade máxima em uma configuração
$w_1$	-	Acréscimo da falta de circularidade inicial
$w_{100}$	-	Acréscimo devido a rotação na falta de circularidade inicial
$w_0$	-	Falta de circularidade verdadeira
$x, y$	-	Coordenadas de um sistema de eixos cartesianos
$x^1, y^1$	-	Coordenadas cartesianas da estação $i$ , em relação ao sistema de eixos
$x', y'$	-	Coordenadas de um novo sistema de eixos
$X^0, Y^0$	-	Esforços aplicados ao casco
$\alpha, \beta$	-	Ângulos da régua em arco
$\Delta R$	-	Mudança de curvatura na direção circumferencial do ponto considerado
$\Sigma$	-	Somatória
$\sigma_c$	-	Tensão de compressão na caverna
$\sigma_f$	-	Tensão de flexão na caverna
$\sigma_{fc}$	-	Tensão normal circumferencial, no casco resistente, devido à falta de circularidade global
$\sigma_t$	-	Tensão normal total nas cavernas
$\sigma_y$	-	Tensão de escoamento do material
$\theta$	-	Ângulo formado pelas direções radiais, ou ângulo radial

- $\theta_1$  - Posição angular do ponto 1
- $\theta_2$  - Posição angular da estação i, em relação ao sistema cartesiano



LISTA DE FIGURAS

Pág

Figura

XXV	I - Falhas de circularidade $w$ e $w'$
XXV	II - Centro ótimo e círculo ótimo
I.3	1.1 - Estrutura típica de um submarino
I.4	1.2 - Definição de falta de circularidade
II.3	2.1 - Deformação do casco resistente entre anteparas
	2.2 - Deslocamento $w$ de uma viga com imperfeição máxima $Y_0$
II.4	2.3.a - Anel sob pressão
II.4	2.3.b - Esforços de contorno
II.8	2.4 - Deformações em um casco cilíndrico
II.10	2.5 - Geometria da caverna
II.14	2.6 - Desalinhamento do eixo de um submersível
III.3	3.1 - Compasso instalado em uma seção de um submersível
III.6	3.2 - Esquema de utilização dos gabaritos circulares
III.8	3.3 - Resultados de uma análise de uma caverna pelo método do compasso
III.10	3.4 - Esquema de montagem do processo do jig e detalhamento dos equipamentos auxiliares utilizados
III.12	3.5 - Cintel utilizado no processo do jig
III.14	3.6 - Procedimento matemático utilizado na análise
III.18	3.7 - Representação da régua em arco
III.18	3.8 - Representação de uma medição com a régua em arco e com o micrômetro sem escala
III.19	3.9 - Processo de medição com a régua em arco
III.21	3.10.a - Inclinação da régua
III.21	3.10.b - Inclinação do micrômetro
III.22	3.11.a - Fixação do paquímetro de profundidade analógico na régua em arco
III.22	3.11.b - Detalhe do apoio lateral
III.22	3.11.c - Detalhe das pastilhas de metal duro
III.23	3.12 - Esquematisação da régua em arco analógica

Página	Figura
III.25	3.13 - Esquema de fixação do paquímetro digital à régua
III.26	3.14.a - Esquema de fixação da régua em arco para fixação do paquímetro digital
III.26	3.14.b - Esquemas das peças utilizadas para fixação do paquímetro digital
III.27	3.15 - Representação esquemática da régua em arco digital
III.29	3.16 - Processo da régua em arco
III.29	3.17 - Falta de circularidade das estações de medição
III.32	3.18 - Contorno obtido (com GAP e OVERLAP)
III.37	3.19 - Representação da primeira solução encontrada
IV.3	4.1 - Distribuição das faltas de circularidade aparentes
IV.11	4.2 - Esquema do gabarito NUCLEP na posição horizontal
IV.13	4.3 - Representação esquemática do paquímetro utilizado para leitura e posição de configurações no gabarito NUCLEP
IV.16	4.4 - Representação gráfica da configuração imposta $C_1$
IV.17	4.5 - Representação gráfica da configuração imposta $C_2$
IV.22	4.6 - Esquema do gabarito NUCLEP na posição vertical
IV.28	4.7.a - Representação gráfica da configuração $C_1$ imposta com a primeira medição de raios
IV.28	4.7.b - Representação gráfica da configuração $C_1$ imposta com a segunda medição de raios
IV.29	4.8.a - Representação gráfica da configuração $C_2$ imposta com a primeira medição de raios
IV.30	4.8.a - Representação gráfica da configuração $C_2$ imposta com a primeira medição de raios

- 4.8.b - Representação gráfica da configuração C<sup>2</sup> imposta com a segunda medição de raios IV.31
- 4.9.a - Representação gráfica da configuração C<sup>2</sup> imposta com a primeira medição de raios IV.38
- 4.9.b - Representação gráfica da configuração C<sup>2</sup> imposta com a segunda medição de raios IV.39
- 4.10.a - Representação gráfica da configuração C<sup>2</sup> imposta com a primeira medição de raios IV.44
- 4.10.b - Representação gráfica da configuração C<sup>2</sup> imposta com a segunda medição de raios IV.45
- 4.11 - Verificação dos raios; utilizando-se o paquímetro e a mesa de centragem IV.50
- 4.12 - Configuração do círculo de referência na primeira medição de raios IV.51
- 4.13 - Configuração do círculo de referência na segunda medição de raios IV.52
- 4.14 - Posicionamento do vão da chapa simuladora do casco no gabarito NUCLÉP IV.54
- 4.15 - Calço de madeira utilizado no vão da chapa simuladora do casco IV.55
- 4.16 - Rotação do ponto inicial da marcação da régua em arco IV.56
- 4.17 - Comparação entre o apoio do paquímetro digital e do paquímetro analógico, na chapa simuladora do casco IV.58
- 6.1 - Representação dos casos possíveis para falta de circularidade determinada VI.5

LISTA DE TABELAS

Pág

Tabela

III.1	- Gabaritos circulares utilizados pelo método do compasso	
III.5		
IV.1	- Relação entre probabilidade e credibilidade e o número de observações dispensáveis, para uma amostra de 64 observações	IV.6
IV.2	- Valores obtidos com a leitura de 5 em 5° da chapa simuladora do casco quando imposta a configuração C <sub>1</sub>	IV.14
IV.3	- Valores obtidos com a leitura de 5 em 5° da chapa simuladora do casco quando imposta a configuração C <sub>2</sub>	IV.15
IV.4	- Resultados obtidos de falta de circularidade aparente para as 64 medições da configuração C <sub>1</sub>	IV.19
IV.5	- Resultados obtidos de falta de circularidade aparente para as 64 medições da configuração C <sub>2</sub>	IV.20
IV.6.a	- Resultados da totalização dos valores de espessura, da primeira medição de raios, e da medição de off-set's para a configuração C <sub>1</sub>	IV.24
IV.6.b	- Resultados da totalização dos valores de espessura, da segunda medição de raios, e da medição de off-set's para a configuração C <sub>1</sub>	IV.25
IV.7.a	- Resultados da totalização dos valores de espessura, da primeira medição de raios, e da medição de off-set's para a configuração C <sub>2</sub>	IV.26
IV.7.b	- Resultados da totalização dos valores de espessura, da segunda medição de raios, e da medição de off-set's para a configuração C <sub>2</sub>	IV.27



IV.8 -	Valores de falta de circularidade aparente para cada uma das 64 medições executadas pelo processo de lig com a configuração C <sup>1</sup> imposta ao gabarito	IV.32
IV.9 -	Valores de falta de circularidade aparente para cada uma das 64 medições executadas pelo processo de lig com a configuração C <sup>2</sup> imposta ao gabarito	IV.33
IV.10.a -	Resultado da totalização dos valores dos off-sets totais para a configuração C <sup>2</sup> (primeira medição dos raios)	IV.36
IV.10.b -	Resultado da totalização dos valores dos off-sets totais para a configuração C <sup>2</sup> (segunda medição dos raios)	IV.37
IV.11 -	Valores de falta de circularidade aparente para cada uma das 64 medições executadas pelo processo da régua em arco analógica, com a configuração C <sup>2</sup> imposta ao gabarito	IV.40
IV.12.a -	Resultados da totalização dos valores dos off-sets totais para a configuração C <sup>2</sup> (primeira medição de raios)	IV.42
IV.12.b -	Resultados da totalização dos valores dos off-sets totais para a configuração C <sup>2</sup> (segunda medição de raios)	IV.43
IV.13 -	Valores de falta de circularidade aparente, para cada uma das 64 medições executadas pelo processo da régua em arco digital, com a configuração C <sup>2</sup> imposta ao gabarito	IV.46
IV.14 -	Amostra das 20 medições executadas no processo de qualificação de um operador do processo da régua em arco analógica	IV.49



- V.1 - Amostra das faltas de circularidade aparentes e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_1$  imposta ao gabarito circular
- V.2 - Amostra das faltas de circularidade aparentes e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_2$  imposta ao gabarito circular
- V.3 - Amostra das faltas de circularidade aparentes e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_2$  imposta ao gabarito circular
- V.4 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com P=93% e C=99% (compasso)
- V.5 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com P=93% e C=99% (jig)
- V.6 - Amostra das faltas de circularidade aparentes e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_1$  imposta ao gabarito circular
- V.7 - Amostra das faltas de circularidade aparentes e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_2$  imposta ao gabarito circular
- V.8 - Amostra dos termos  $D_0$  da série de Fourier e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_1$  imposta ao gabarito circular
- V.9 - Amostra dos termos  $D_0$  da série de Fourier e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_2$  imposta ao gabarito circular
- V.10 - Amostra dos termos  $D_0$  da série de Fourier e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_1$  imposta ao gabarito circular

- V.9 - Amostra dos termos  $B_0^s$  da série de Fourier e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_2$  imposta ao gabarito circular
- V.10 - Amostra dos termos  $D_0^4$  da série de Fourier e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_2$  imposta ao gabarito circular
- V.11 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com P=93% e C=99% (Jig)
- V.12 - Amostra das faltas de circularidade  $w'$  e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_1$  imposta ao gabarito circular
- V.13 - Amostra das faltas de circularidade  $w'$  e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_2$  imposta ao gabarito circular
- V.14 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com P=93% e C=99%
- V.15 - Amostra das faltas de circularidade aparentes e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_2$  imposta ao gabarito circular
- V.16 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com P=93% e C=99% (Jig)

- V.17 - Amostra dos termos  $B_0^4$  da série de Fourier e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_z$  imposta ao gabarito circular
- V.18 - Amostra dos termos  $D_0^3$  da série de Fourier e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_z$  imposta ao gabarito circular
- V.19 - Amostra das faltas de circularidade  $w'$  e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança e probabilidade C para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_z$  imposta ao gabarito circular
- V.20 - Amostra das faltas de circularidade e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_z$  imposta ao gabarito circular
- V.21 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com  $P=93\%$  e  $C=99\%$
- V.22 - Amostra dos termos  $B_0^4$  da série de Fourier e valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com  $P=93\%$  e  $C=99\%$  (fig)
- V.23 - Amostra dos termos  $B_0^4$  da série de Fourier e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_z$  imposta ao gabarito circular
- V.24 - Amostra dos termos  $D_0^3$  da série de Fourier e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_z$  imposta ao gabarito circular
- V.25 - Amostra dos termos  $D_0^3$  da série de Fourier e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_z$  imposta ao gabarito circular
- V.26 - Amostra dos termos  $D_0^3$  da série de Fourier e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_z$  imposta ao gabarito circular

- V.25 - Amostra das faltas de circularidade  $\hat{d}_0$  e amplitude  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada par credibilidade C e probabilidade P, para a configuração  $C_2^z$  imposta ao gabarito circular
- V.26 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com P=93% e C=99%
- V.24 - Casos possíveis para a falta de circularidade determinada
- VI.1 - Resultados obtidos pelo processamento do programa CIRSUBDO para os dados da tabela IV.1
- A.1 - Resultados obtidos pelo processamento do programa ESCOAMEN para os dados da tabela IV.1
- A.2 - Resultados obtidos pelo processamento do programa ESCOAMEN para os dados da tabela IV.2
- A.3 - Resultados obtidos pelo processamento do programa ESCOAMEN para os dados da tabela IV.2
- A.4 - Resultados obtidos pelo processamento do programa ESCOAMEN para os dados da tabela IV.2
- A.8 - Resultados obtidos do raio e dos desvios radiais da primeira medição de raios do círculo de referência
- B.1 - Resultados obtidos do raio e dos desvios radiais da segunda medição de raios do círculo de referência
- B.2 - Resultados obtidos do raio e dos desvios radiais da primeira medição de raios do círculo de referência
- B.3 - Resultados obtidos do raio e dos desvios radiais da segunda medição de raios do círculo de referência
- B.4 - Resultados obtidos pelo processamento do programa ESCOAMEN para os valores dos off-sets totais para a configuração  $C_1$  (primeira medição de raios)
- B.6 - Resultados obtidos pelo processamento do programa ESCOAMEN para os valores dos off-sets totais para a configuração  $C_1$  (primeira medição de raios)
- B.8 - Resultados obtidos pelo processamento do programa ESCOAMEN para os valores dos off-sets totais para a configuração  $C_1$  (primeira medição de raios)



- B.5 - Processamento do programa CIRSUBDO para os valores dos off-sets totais para a configuração  $C_1$  (segunda medição de raios) B.10
- B.6 - Processamento do programa ESCOAMEN para os valores dos off-sets totais para a configuração  $C_1$  (segunda medição de raios) B.12
- B.7 - Processamento do programa CIRSUBDO para os valores dos off-sets totais para a configuração  $C_1$  (primeira medição de raios) B.14
- B.8 - Processamento do programa ESCOAMEN para os valores dos off-sets totais para a configuração  $C_1$  (primeira medição de raios) B.16
- B.9 - Processamento do programa CIRSUBDO para os valores dos off-sets totais para a configuração  $C_1$  (segunda medição de raios) B.18
- B.10 - Processamento do programa ESCOAMEN para os valores dos off-sets totais para a configuração  $C_1$  (segunda medição de raios) B.20
- C.1 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da primeira medição de raios, e da medição de off-sets para a configuração  $C_2$  (otimização do centro e raios) C.2
- C.2 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da primeira medição de raios, e da medição de off-sets para a configuração  $C_2$  (componentes da série de Fourier) C.4
- C.3 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da segunda medição de raios, e da medição de off-sets para a configuração  $C_2$  (otimização do centro e raios) C.6



- C.4 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da segunda medição de raios, e da medição de off-sets para a configuração  $C_z$  (componentes da série de Fourier) C.8
- D.1 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da primeira medição de raios, e da medição de off-sets para a configuração  $C_z$  (otimização do centro e raio) D.2
- D.2 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da primeira medição de raios, e da medição de off-sets para a configuração  $C_z$  (componentes da série de Fourier) D.4
- D.3 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da segunda medição de raios, e da medição de off-sets para a configuração  $C_z$  (otimização do centro e raio) D.6
- D.4 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da segunda medição de raios, e da medição de off-sets para a configuração  $C_z$  (componentes da série de Fourier) D.8

DEFINIÇÕES

-FALTA DE CIRCULARIDADE (w)

É toda e qualquer distância radial  $w_0$  que o contorno da seção transversal do casco resistente do submarino apresenta em relação a um círculo de referência, cujos raios e posições de seu centro são estabelecidos por alguma regra pré-determinada (ver figura I).

-MÁXIMA FALTA DE CIRCULARIDADE ( $w_{max}$ )

É a máxima falta de circularidade observada, quando adotado um círculo, chamado círculo ótimo, de raio ótimo e centro ótimo, tais que, esse máximo fique minimizado (ver figura II).

-FALTA DE CIRCULARIDADE ESPECÍFICA ( $w'$ )

É a falta de circularidade, porém descontando-se as componentes que não correspondem à deformação do casco, (ver figura I). A falta de circularidade é dada por:

$$w(\theta) = B_0^0 + B_1^0 \cos \theta + D_1^0 \sin \theta + \sum_{n=2}^{\infty} (B_{on} \cos n\theta + D_{on} \sin n\theta)$$

Dai tem-se que:

$$w'(\theta) = w - (B_0^0 + B_1^0 \cos \theta + D_1^0 \sin \theta)$$

ou ainda:

$$w'(\theta) = \sum_{n=2}^{\infty} (B_{on} \cos n\theta + D_{on} \sin n\theta)$$

Essa falta de circularidade específica  $w'$  é utilizada em alguns critérios, aliada a máxima falta de circularidade  $w_{max}$ , para aprovação ou reprovação de cavernas. Na referência [28], é fornecido um exemplo prático da utilização de um desses critérios.

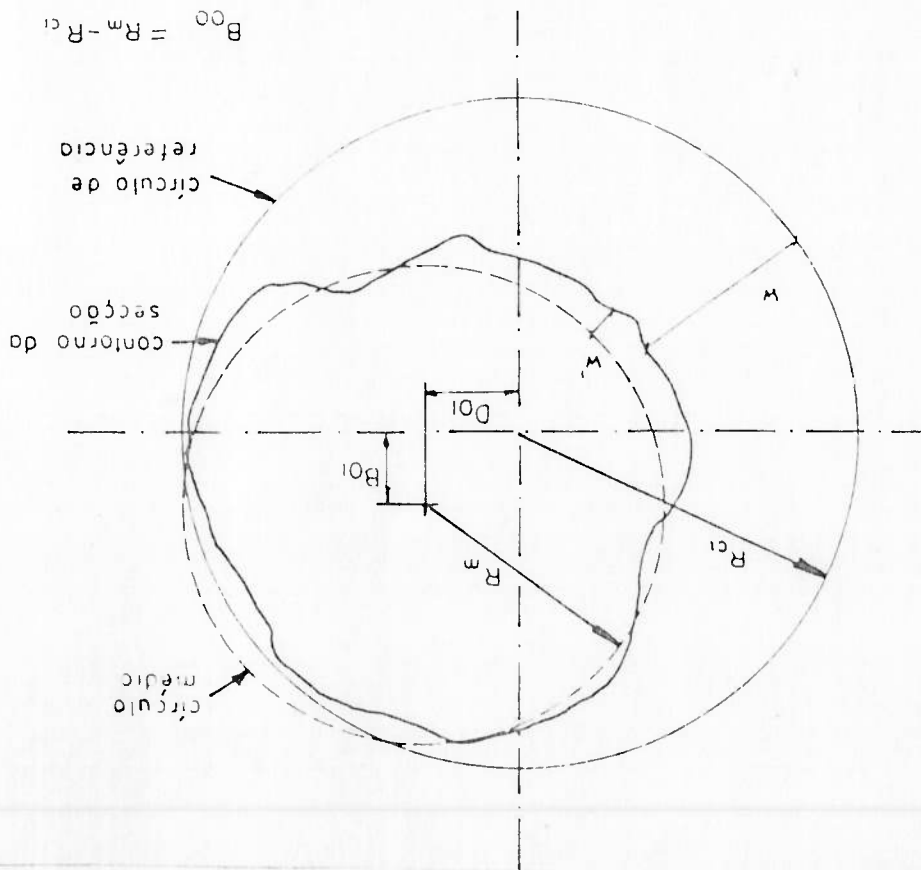


Figura I - Falta de circularidade  $w$  e  $w'$

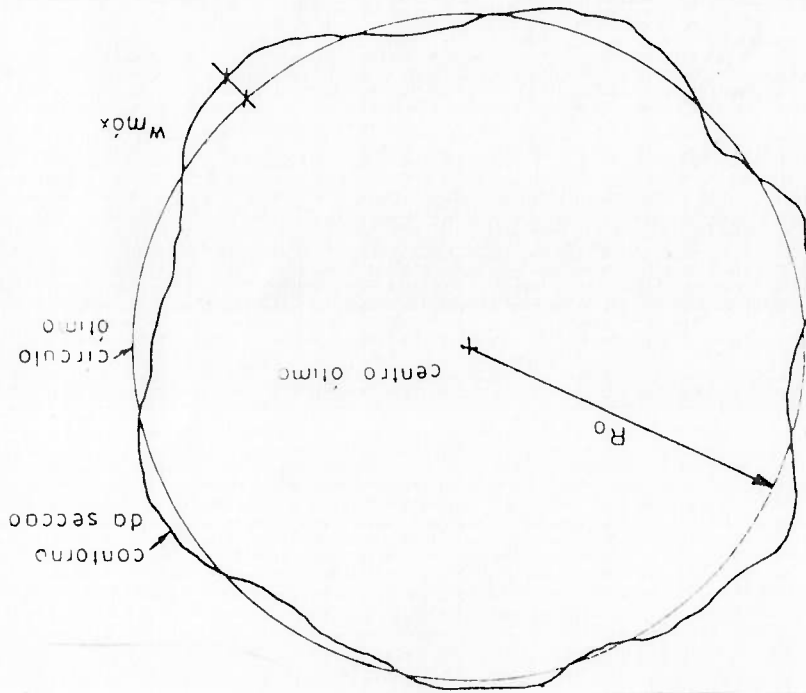


Figura II - Centro ótimo e circulo ótimo

-PROCESSO DE MEDIÇÃO

Esta expressão é utilizada para designar um certo procedimento que busca obter a falta de circularidade de secções do casco resistente de submarinos. São partes integrantes do processo : os instrumentos de medida, a sequência e os métodos de medição, os operadores e a análise dos resultados.

-CONFIGURAÇÃO

Denomina-se configuração, à expressão matemática que reproduz a forma da falta de circularidade da secção do casco resistente. A configuração é representada, na forma de uma expressão matemática, como função do ângulo em que será especificado cada valor de falta de circularidade.

-ESTACÃO

É o nome que se dá a cada um dos pontos, ao longo da secção transversal do casco, onde são realizadas as medidas dos "off-sets".

-OFF-SET

É o valor da distância radial, medida em cada estação.

-MEDIÇÃO

Chama-se medição ao conjunto dos valores dos "off-sets" medidos ao longo de toda uma volta na circunferência da secção. Ao reiniciar-se o processo de medição inicia-se, consequentemente, uma nova medição.



-FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE ( $w_{op}$ )

É o valor da falta de circularidade obtido por qualquer um dos processos de medição. A designação aparente, advém do fato de que, qualquer processo de medição está sujeito a erros, levando a um resultado de falta de circularidade diferente do valor real.

-RAIO ÓTIMO E CENTRO ÓTIMO

São o raio e o centro de um círculo tais que, a máxima falta de circularidade da secção medida em relação a esse círculo, tenha seu valor minimizado. (ver figura II).

-CÍRCULO ÓTIMO

É o círculo definido pelo raio e pelo centro ótimos.

-ERRO

Define-se erro como sendo um valor que esteja fora do intervalo de confiança definido pelo erro do processo.

-ERRO DO PROCESSO

É o valor da amplitude máxima entre um valor padrão e um valor selecionado através de um critério probabilístico.

-ACERTO

É o inverso do erro, ou seja, é um valor qualquer dentro do intervalo de confiança definido pelo erro do processo.

-TESTE DE CLASSIFICAÇÃO

Procedimento que consiste na medição da falta de circularidade, executada um determinado número de vezes, e na classificação da mesma em aceitável ou não, de acordo com a regra aplicada aos valores, dessa falta de circularidade, obtidos nas medições.

-CONFIABILIDADE

Probabilidade de que um teste de classificação, ao ser utilizado em uma determinada caverna, conduza a uma decisão correta sobre sua aceitabilidade, ou não. Em outras palavras, é a probabilidade de um processo qualificado conduzir a uma decisão correta.

-CREDIBILIDADE

A credibilidade de um intervalo de confiança  $\hat{p}$ , 1.0], é a probabilidade de um parâmetro  $p$ , estimado dentro deste intervalo, pertencer ao conjunto  $[\hat{p}, 1.0]$ .

No final de 1977, tornou-se público que a Marinha do Brasil (MB) contemplava a possibilidade de vir a fabricar submarinos no país, em continuação ao esforço de nacionalização de seu material. A partir de então, a Marinha passou a investir ainda mais em pesquisa e desenvolvimento na área de veículos submarinos.

No âmbito do Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, (DEN-EPUSP), já em 1978, iniciaram-se atividades de pesquisas na área de projeto, fabricação, reparos e instrumentação de veículos submarinos, com o objetivo de criar capacitação nacional, dando condições para que a "transferência de tecnologia" dos países mais desenvolvidos fosse realizada de forma mais crítica e ativa, possibilitando, a médio prazo, a execução de projetos internacionalmente nacionais.

No que se refere à estrutura dos veículos submarinos, ao longo das supracitadas atividades de pesquisa, foram compilados os recursos de cálculo estrutural, existentes tanto no país como no exterior.

A maioria dos conhecimentos sedimentados, em cada uma dessas entidades, são de divulgação limitada ao seu próprio meio, estendendo-se, quando muito, aos escritórios de projeto por elas contratados. O simples levantamento de informações e tarefa de difícil execução, porque, do segredo inerente à divulgação, resultam dados de forma incompleta e desordenada, exigindo, por parte do pesquisador, análise crítica no reordenamento e na classificação das informações disponíveis para, só então, transformá-las em conhecimento produtivo.

O desenvolvimento desses trabalhos exigiu um amplo estudo da escassa literatura publicada, contatos pessoais com pesquisadores de centros mais avançados e estudos próprios.

## I.1 - EXPLANAÇÕES INICIAIS

### INTRODUÇÃO

### CAPÍTULO I

Um submersível, como se sabe, deve cumprir um dado perfil de operação e, para tanto, são projetados seus sistemas de propulsão, elétricos, de armamentos, etc, de cujos espaços requeridos resulta a definição do arranjo físico estrutural de posse do arranjo físico, deve ser dimensionada a estrutura de tal forma que o submarino possa alcançar a profundidade máxima de operação com grande segurança. O arranjo de uma estrutura típica recorre ao uso de casco resistente, cavernas, anteparas, cavernas gigantes, troncos cônicos e calotas de proa e popa, conforme pode ser visto na figura 1.1, retirada do PNA [1].

As principais falhas estruturais, alvo de atenção no projeto da estrutura típica de um submarino, são classificadas em: colapso do casco entre cavernas, flambagem global, flambagem lateral e início do escoamento das cavernas. Os Critérios de Projeto levam em consideração, em ordem hierárquica própria, cada uma destas falhas.

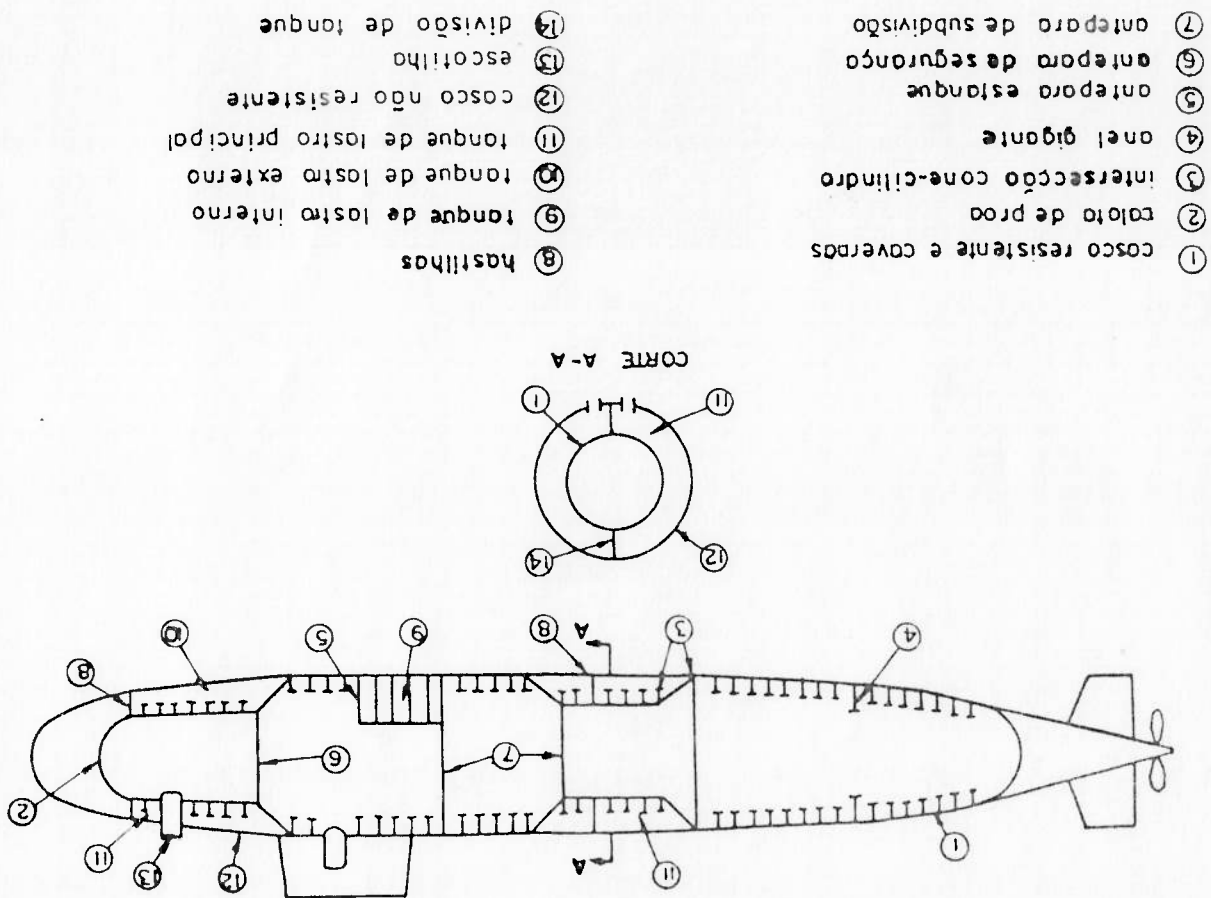
Em alguns critérios de projeto, como no americano, apresentado na DDS 9910-8 [2], ou no alemão, indicado na BV-1041-2 [3], a falha estrutural das cavernas tem importância decisiva na definição da profundidade máxima de operação do submarino, quando a tensão normal de compressão, adicionada à tensão normal de flexão, atinge o escoamento em pontos isolados do flange livre.

As tensões de flexão ocorrem devido à existência de imperfeições de forma, oriundas dos processos de fabricação, que afastam o casco resistente de sua forma perfeitamente circular. Assim, o casco não perfeitamente circular tem, como fator determinante do início de escoamento, o que se denominará, Falta de Circularidade.

Cada ponto da secção transversal possui uma distância radial em relação a um círculo de referência (figura 1.2). Entre todos os pontos, a máxima distância é chamada de máxima falta de circularidade. Também, essas distâncias radiais, de cada ponto, variam, em função da posição relativa entre a secção, e esse círculo de referência. Existe um círculo de referência, com um certo raio, chamado raio ótimo, e uma posição quando se diz que



Figura 1.1 - Estrutura típica de um submarino



- ① casco resistente e coverdas
- ② coloto de proa
- ③ intersecção cone-cilindro
- ④ anel gigante
- ⑤ antepara estanque
- ⑥ antepara de segurança
- ⑦ antepara de subdivisão

- ⑧ hastilhas
- ⑨ tanque de lastro interno
- ⑩ tanque de lastro externo
- ⑪ tanque de lastro principal
- ⑫ casco rdo resistente
- ⑬ escotilha
- ⑭ divisão de tanque

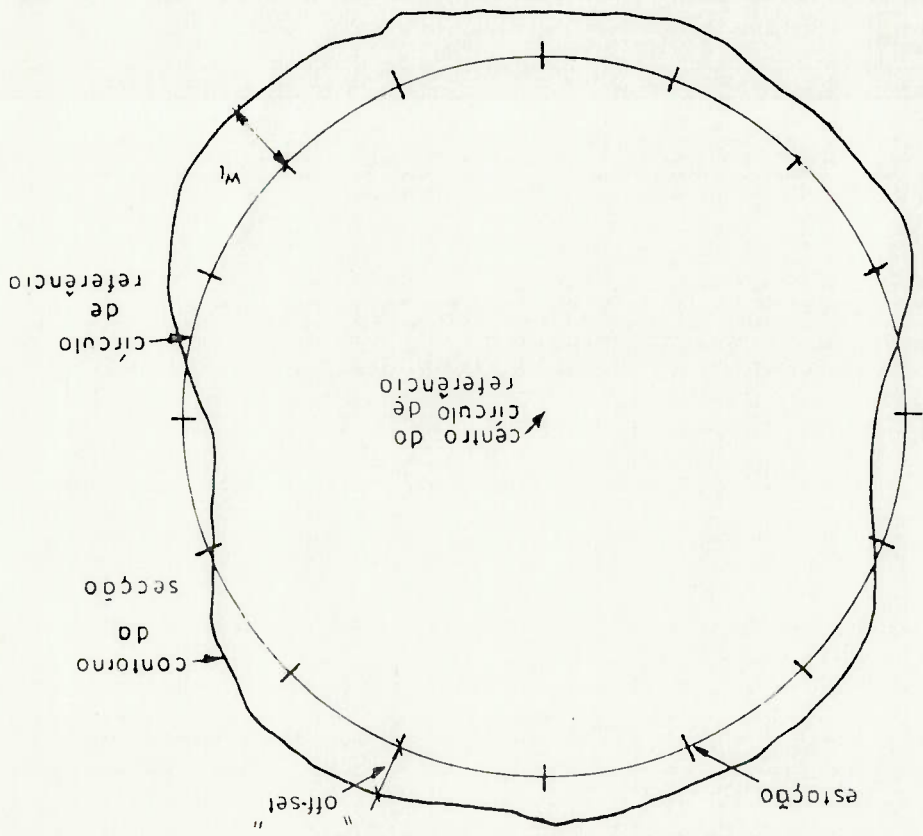


Figura 1.2 - Definição de falta de circularidade

Em âmbito nacional, o trabalho justifica-se pelo atual estado da arte, em projeto e análise de estruturas de submersíveis, uma vez que muito pouco é divulgado sobre os

de ensino.

- Servir como fonte de consultas, em nível profissional ou

submersível.

- Definir, entre os processos estudados, qual o melhor a ser utilizado durante a fabricação e qual durante toda a vida útil do

processo.

- Apresentar um critério de aceitação de uma caverna, baseando-se, para tanto, no valor de falta de circularidade obtida pelo processo de medição e no valor do erro deste

- Qualificar cada processo de medição de falta de circularidade, procedendo, para tanto, à criação de um método eficiente e próprio para a quantificação de seu erro máximo.

- Avaliar os principais processos de medição de falta de circularidade, utilizados atualmente pela Marinha do Brasil (MB). Esta avaliação será feita a partir de um minucioso estudo de trabalhos publicados em congressos e de relatórios técnicos executados no Centro de Estruturas Navais e Oceânicas da Universidade de São Paulo (CENO-USP).

O trabalho tem como objetivos principais:

## 1.2 - OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO

seu centro está posicionado no centro ótimo, em que a máxima falta de circularidade assume o seu valor mínimo. Para designar este valor mínimo da máxima falta de circularidade será, simplesmente, utilizada a denominação: "máxima falta de circularidade".



processos de medição de falta de circularidade, sendo as informações disponíveis insuficientes para dar sustentação e segurança à realização de projetos eficientes

Não existe fonte de referência que trate, de maneira completa e consubstanciada, os procedimentos de qualificação para os diversos processos de medição de falta de circularidade, os próprios processos de medição e a abordagem estatística dada à qualificação.

Em decorrência dos planos de reaparelhamento da Marinha do Brasil (MB), tornou-se imprescindível o desenvolvimento de procedimentos que, consubstanciados nos conhecimentos já adquiridos, pudessem ser aplicados para qualificação dos processos de medição de falta de circularidade, úteis na avaliação da segurança das cavernas de um submersível.

Os principais utilizadores dos resultados deste trabalho, no âmbito da Marinha Brasileira serão a Diretoria Geral do Material da Marinha (DGMD), através da Diretoria de Engenharia Naval (DEN) e o Arsenal de Marinha (AMRJ).

Fora do âmbito militar, o material apresentado pode ser de interesse para empresas que prestem serviços submarinos em instalações de prospecção de petróleo no mar, estaleiros de fabricação de plataformas de prospecção de petróleo, e como base de estudo para processos de qualificação de instrumentos de medição pouco convencionais.



Como decorrência do conteúdo prescrito pelos objetivos do trabalho, estabeleceu-se um enfoque geral, abrangente e não específico, para a qualificação dos processos de medição de falta de circularidade. No entanto alguns aspectos específicos foram abordados mais elaboradamente, de maneira a dar respaldo ao desenvolvimento do assunto.

No capítulo II, é mostrado o que se convencionou chamar de falta de circularidade, os principais efeitos da falta de circularidade do casco resistente, e um modelo analítico para a análise dos seus efeitos, de modo a melhor quantificar os procedimentos de qualificação.

No capítulo III, são definidos os instrumentos de medição, descrições detalhadamente os processos de medição utilizados e os métodos de análise dos resultados desenvolvidos para cada um desses processos.

No capítulo IV, são abordados os métodos estatísticos utilizados para a qualificação dos processos de medição e de seus operadores. São abordados, também, os problemas encontrados durante a qualificação de cada um dos processos de medição de falta de circularidade.

No capítulo V, são apresentados os resultados obtidos, dos métodos estatísticos descritos no capítulo IV, e os resultados dos processos de qualificação descritos.

No capítulo VI, é apresentado um critério de aceitação para uma caverna baseada no erro do processo de medição e no valor de falta de circularidade encontrado.

No capítulo VII, são apresentadas as conclusões sobre os trabalhos executados, definindo dentro os processos qualificados, qual o mais apropriado para utilização durante a construção e qual para toda a vida útil do submersível.

## CAPÍTULO II

## FALTA DE CIRCULARIDADE

## II.1 - INTRODUÇÃO

A geometria ideal de um submersível sem imperfeições é aquela em que todas as secções transversais do casco resistente são circunferências perfeitais, e em que seu eixo longitudinal é perfeitamente perpendicular ao plano das anteparas e cavernas. Já que isso não acontece, pode-se cogitar da existência, dentre outras, das seguintes imperfeições como resultado da construção ou de reparos efetuados:

- a) deformação do casco resistente entre anteparas, envolvendo a falta de circularidade das cavernas;
- b) desalinhamento do eixo do submarino;
- c) falta de circularidade do casco resistente entre cavernas, mantendo-se as cavernas inalteradas;
- d) deformações de cavernas para fora de seus planos.

Exemplificando para a imperfeição do tipo a), acima descrita, sabe-se que provocará tensões de flexão, com valor máximo no flange das cavernas, que se superporão às de compressão que já ocorrem mesmo sem imperfeição, (ver figura 2.1). E, então, necessário calcular essa tensão de flexão na caverna,  $\sigma_f$ , e ver-se-á nos próximos itens, que esse cálculo relaciona-se com uma das formas de flambagem, qual seja, a flambagem global. Do ponto de vista teórico, a flambagem é estudada para certas geometrias e cargas idealizadas, tais como, uma barra perfeitamente reta sob carga axial, uma placa sob compressão uniforme, etc. As chamadas cargas críticas obtêm-se dessas formulações teóricas.



Quando se analisam os mesmos casos acima, adicionando-se o efeito de imperfeições geométricas, verifica-se que, no regime elástico, não ocorre aquela relação infinita de onde provam as cargas críticas. Verifica-se também que as cargas críticas teóricas continuam a ser úteis, pois é pouco abaixo delas que as deformações passam a crescer drasticamente, levando a tensões sempre inaceitáveis, como pode ser visto na figura 2.2. A rigor, porém, a existência de imperfeições faz com que inexistam a flambagem matematicamente caracterizada.

Nos casos acima, ainda tomados como exemplo, o que realmente ocorre, durante a aplicação do carregamento, é a superposição de tensões de flexão à de compressão.

Tome-se, como exemplo o caso de um anel isolado sob pressão externa, com uma dada falta de circularidade inicial,  $w$  (ver figura 2.3.a). Na figura 2.3.b mostra-se um trecho do anel sob pressão  $p$  e esforços de contorno. Usa-se um sistema  $x, y$  de eixos, com origem no ponto onde agem os esforços  $M_0, X_0, Y_0$  e com o centro do anel tendo coordenadas  $(x, y)$ .

Para o equilíbrio tem-se:

$$M = -M_0 + Y_0 x + X_0 y + \frac{p}{2} (x^2 + y^2) \quad (II.1)$$

onde:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= x + u \\ \bar{y} &= y + v \end{aligned}$$

(II.2)

$\bar{x}, \bar{y}$  = coordenadas iniciais do ponto onde age  $M$ ;  
 $x, y$  = coordenadas finais do ponto onde age  $M$ ;

tem-se ainda:

$$\begin{aligned} x &= \bar{x} + r \cos \theta \\ y &= \bar{y} + r \sin \theta \end{aligned}$$

(II.3)

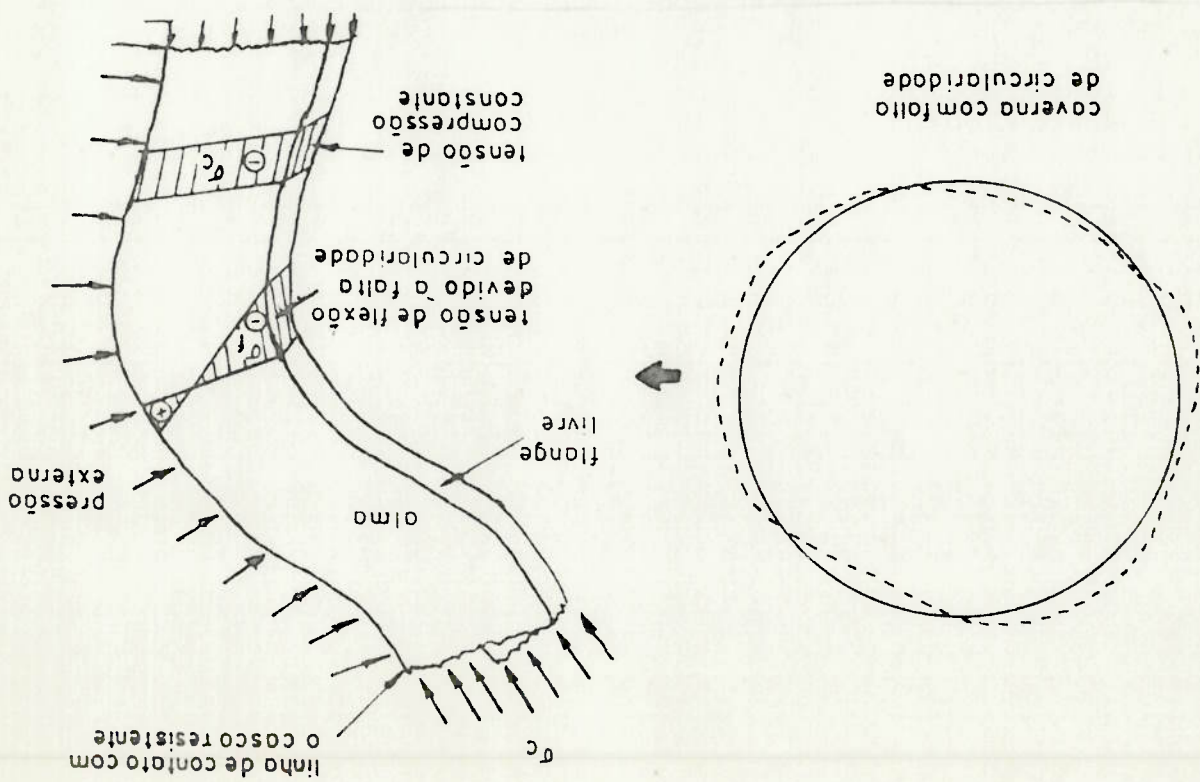


Figura 2.1 - Deformação do casco resistente entre anteparas

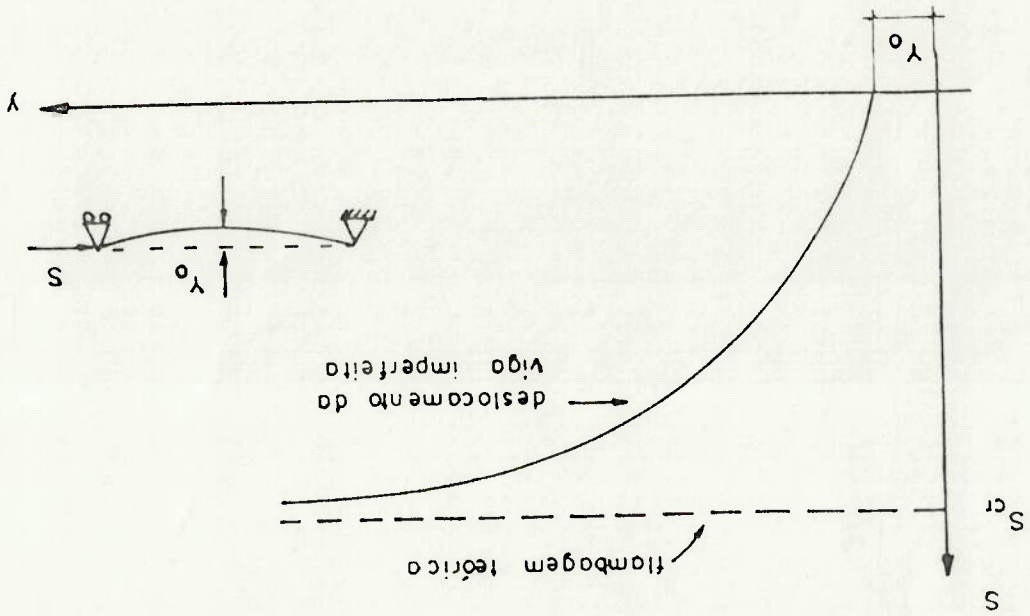


Figura 2.2 - Deslocamento  $w$  de uma viga com imperfeição máxima  $y_0$



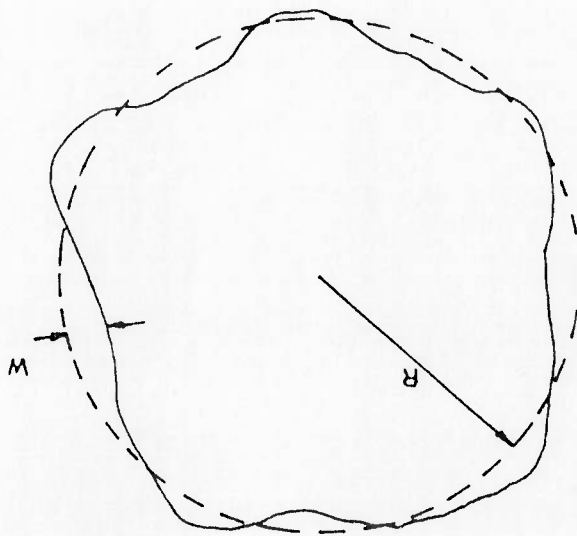


Figura 2.3.a - Anel sob pressão

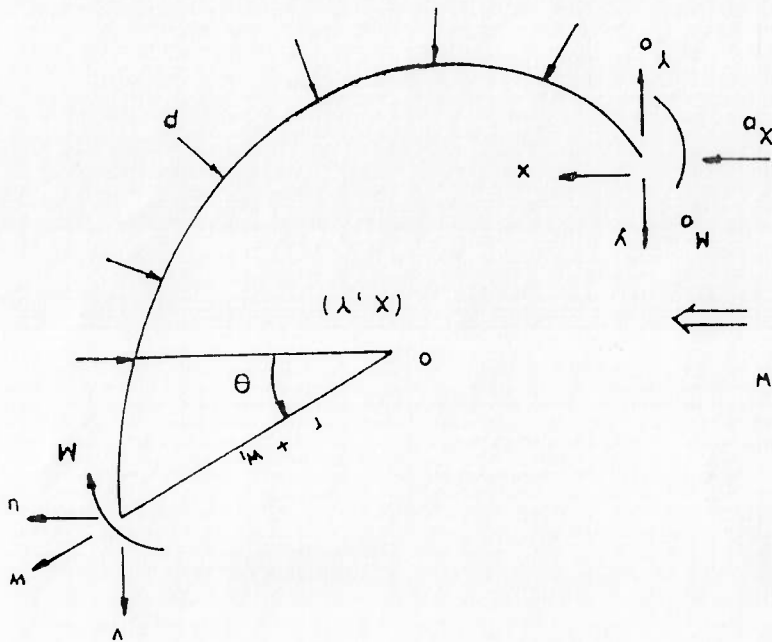


Figura 2.3.b - Esforços de contorno

onde:

r é a distância do ponto onde age M, até o centro, antes da aplicação da carga p.

Sabe-se que:

$$AR = \frac{R^2}{(w_1 + w_{1\theta})}$$

(II.4)

onde:

w<sub>1</sub> - parcela do deslocamento radial devida à flexão. Corresponde ao acréscimo da falta de circularidade inicial;

ΔR - mudança de curvatura na direção circumferencial do ponto considerado.

w<sub>1θ</sub> - parcela do deslocamento radial devida à rotação.

Para o arco completo, pode-se escrever:

$$\begin{aligned} X_0 &= p Y \\ Y_0 &= p X \end{aligned}$$

(II.5)

Os valores acima são exatos para um anel perfeitamente circular e aceitáveis desde que a falta de circularidade não seja exagerada.

Usando as relações precedentes na equação (II.1), e tomando somente as componentes de primeira ordem dos deslocamentos vem:

$$M = -M_0 - p r w_1 - \frac{p (r_2^0 - r_1^0)}{2}$$

(II.6)

$$r_2^0 = x^2 + y^2$$

Tomando r = R + w e r<sub>0</sub> = R têm-se:

$$M = -M_0 - p R (w_1 + w)$$

(II.7)

A constante M<sub>0</sub> pode ser tomada nula, porque ela provoca um deslocamento radial constante.

No regime elástico têm-se:

$$M = EI \Delta R$$

(II.8)

Portanto de (II.4), (II.7) e (II.8) vem:

$$EI (w_1 + w_2 \theta) = -p R (w_1 + w) \tag{II.9}$$

Para uma falta de circularidade inicial da forma

$w = e \cos n\theta$  a solução da equação (II.9) é:

$$w_1 = \frac{p e \cos n\theta}{p_{cr} - p}$$

(II.10)

onde

$$p_{cr} = \frac{R^2}{(n^2 - 1) EI}$$

Portanto, aparece aqui a amplificação da imperfeição inicial

ditada pelo valor da pressão de flambagem correspondente.

Da mesma forma, uma caverna com falta de circularidade fica

sujeita a tensões de flexão e compressão. Nesse caso Buelta [4],

afirma que, tal como se faz para a barra, supõe-se que, se as

imperfeições iniciais forem suficientemente pequenas, elas podem

ser ignoradas no cálculo da tensão de compressão. Para esse

cálculo, admite-se que a caverna é perfeitamente circular,

enquanto a falta de circularidade só influi na tensão de flexão.

Nos itens seguintes, irá ser tratado o problema do cálculo

da flexão, de modo a superpor-la à compressão.

II.2 - EFEITOS DA FALTA DE CIRCULARIDADE DO CASCO RESISTENTE

Serão analisados primeiramente, os efeitos da imperfeição a) citada na introdução deste capítulo. Isto corresponde a um casco com formato cilíndrico não perfeito, como o esquematizado na figura 2.4.

A falta de circularidade inicial do chapamento, entre anteparas, pode ser expressa, no caso geral, por uma série de Fourier:

$$w = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} B_{mn} \cos n\theta \sin \left( \frac{L}{m\pi x} \right) + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} D_{mn} \sin n\theta \sin \left( \frac{L}{m\pi x} \right)$$

(II.11)

onde:

$w$ , corresponde ao desvio da superfície média do casco, em relação à circunferência de raio  $R$  do cilindro ideal; a isto convençionou-se chamar de falta de circularidade.

Kendrick [6], realizou o desenvolvimento teórico para computar como o valor da falta de circularidade inicial  $w_0$  é alterado sob a ação de uma pressão externa. Admitindo para falta de circularidade inicial apenas um dos termos da equação (II.11), temos:

$$w = B_0 \cos n\theta \sin \left( \frac{L}{m\pi x} \right)$$

(II.12)

Kendrick obtém o valor de  $w$  sob pressão externa, apresentando uma solução extremamente trabalhosa.

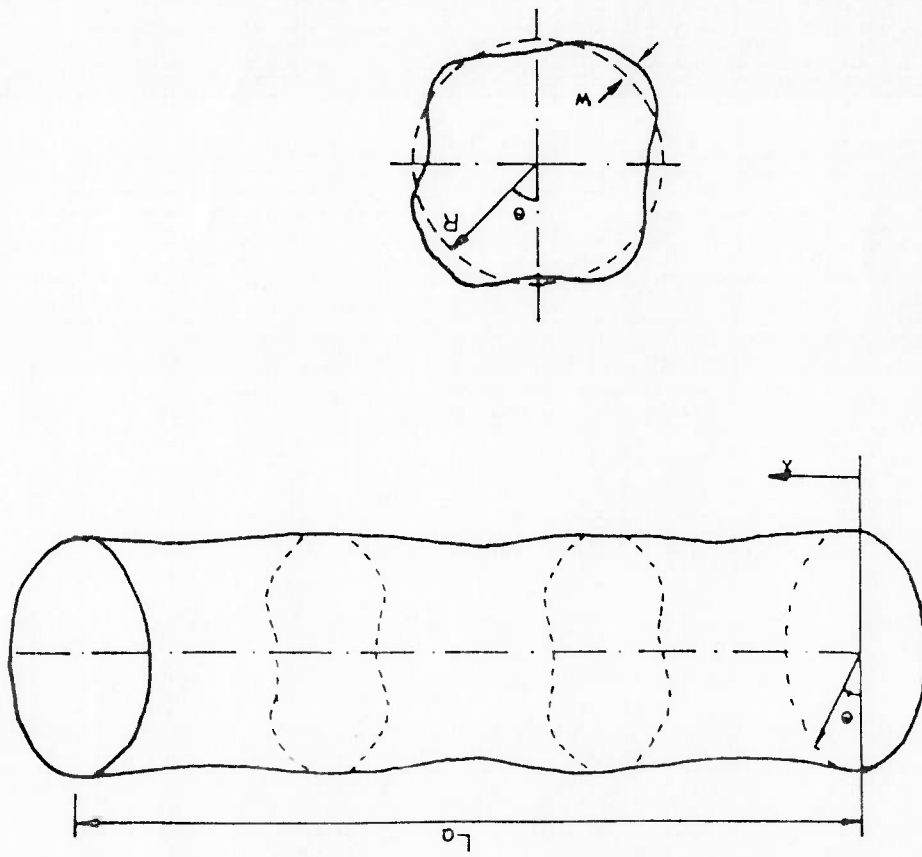
No entanto, através de exemplos numéricos, mostra que bons resultados podem ser obtidos se for utilizada a expressão:

$$w_1 = w \frac{p^{cr}_n - p}{p}$$

(II.13)



Figura 2.4 - Deformações em um casco cilíndrico



onde:

- $w_1$  - é o acréscimo à falta de circularidade inicial;
- $w$  - é a falta de circularidade inicial, dada pela equação (II.12);
- $p$  - é a pressão externa;
- $p_{crn}$  - pressão de flambagem elástica global, do cilindro, correspondente à forma dada pela equação (II.12).

Como já se pôde notar, a mudança de curvatura na direção circunferencial pode ser expressa pela equação (II.4). Considerando-se a circunferência de raio  $R_c$  do perfil formado pela caverna mais chapa colaborante, a tensão no flange deste perfil, imposta pela mudança de curvatura  $\Delta R$  vale:

$$\sigma_f = e c \Delta R \quad (II.14)$$

onde:

- $c$  - é a distância do flange à linha neutra do perfil acima definido, como pode ser visto na figura 2.5.

Combinando II.12, II.13 e II.14 resulta em:

$$\sigma_f = \frac{(n^2 - 1) E c B_0 R_c^2}{p} \times \frac{p_{cr} - p}{p} \times \cos n\theta \operatorname{sen} \left( \frac{L^a}{\pi x} \right) \quad (II.15.a)$$

onde:

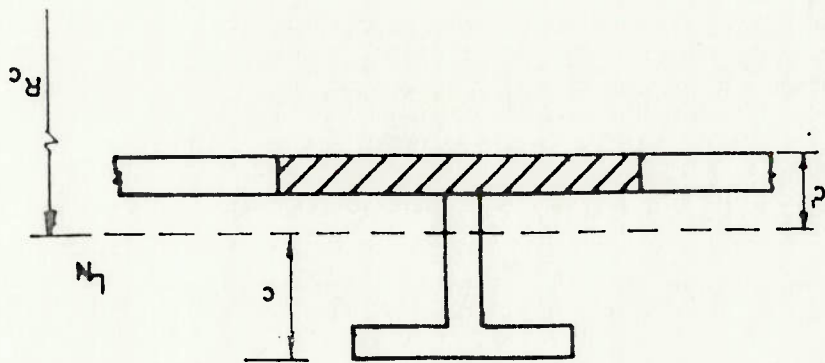
- $\sigma_f$  - é a tensão de flexão no flange da caverna devido à falta de circularidade  $w$ , sob pressão  $p$ ;
- $B_0$  - é a máxima falta de circularidade inicial.

Como o casco resistente entra como flange da viga analisada, nele também existirá tensões, que podem ser calculadas por:

$$\sigma_{fc} = \sigma_f \frac{c}{c'} \quad (II.15.b)$$

onde:

Figura 2.5 - Geometria da caverna



$\sigma_f$  - é a tensão de flexão, transversal, no casco resistente;  
 $c'$  - é a distância do ponto considerado no casco, à linha neutra do perfil, como pode ser visto na figura 2.5.  
 Note-se que a tensão ao longo da circunferência varia com a mesma forma de  $w$ , e é comandada pelo valor de  $p^{cr}_n$ . Tanto (II.13) como (II.15) seguem a norma que comanda os efeitos de imperfeição de forma em qualquer estrutura.

Sempre encontra-se o fator  $\frac{p^{cr} - p}{p}$  de ampliação da imperfeição inicial (vigas, anéis, etc.). Neste caso, apesar de não existir uma prova formal da relação (II.13), os exemplos já calculados mostram boa concordância com a "solução exata" apresentada por Kendrick [25], para pressões de até 60% de  $p^{cr}_n$ , o que é usual em submersíveis.

Ao valor  $\sigma_f$  de (II.15), deve-se somar a tensão de compressão  $\sigma_c$  dada, por exemplo, por Von Sanden e Ghunter [6], obtendo-se o valor final da tensão, (ver figura 2.1).  
 Surge aqui a verdadeira importância do valor de  $p^{cr}_n$ , pois é ele que comanda a tensão  $\sigma_f$  na caverna.  
 Para o cálculo de  $p^{cr}_n$ , utiliza-se usualmente, ao invés da solução geral de Kendrick [5], a equação simplificada de Bryant [27]. É ela:

$$p^{cr}_n = \frac{2Ect/2R}{[n^2 (L^2/R^2 - 1)^2]} \times \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left( \frac{L^2}{R^2} \right)^2} + \frac{R^3 L^3}{(n^2 - 1) EI}$$

onde:  
 $L^c$  - é a distância entre cavernas  
 $R$  - é o raio da superfície média do casco resistente  
 $R^c$  - é o raio da linha neutra à flexão do perfil formado pela caverna e a chapa colaborante



As razões que permitem que seja lançado mão dessa

simplificação estão descritas a seguir:

a) A equação (II.13) foi comprovada numericamente por Kendrick, para alguns casos e pequenos valores de  $n$ , sempre utilizando a pressão de flambagem global calculada segundo solução geral.

b) Como é constatado na prática, imperfeições relevantes ocorrem sempre sob um número de ondas transversais  $n$  pequeno. Não se admite que a falta de circularidade ocorra com muitas ondas transversais, pois isto caracterizaria um péssimo processo de construção. Ora, é para valores pequenos de  $n$ , que a equação de Bryant e a solução geral apresentam valores semelhantes, justificando a utilização da primeira.

c) Durante o projeto, não sendo conhecida a real falta de circularidade, admite-se um valor máximo para  $B_0$  (amplitude) e calcula-se a tensão e calcula-se a tensão de flexão nas cavernas, supondo que a falta de circularidade venha a ocorrer naquela forma que maximize  $\sigma_f$ , o que equivale a maximizar  $(n^2 - 1) \frac{P}{P}$  (ver item II.3). Tem-se constatado

$$P^{cr} - P$$

numericamente que, utilizando Bryant, o valor de  $P^{cr}$  corresponde ao  $n$  que maximiza a expressão acima, praticamente coincide com o valor de  $P^{cr}$  dado pela solução geral. Portanto, no que tange a projeto, o uso de Bryant é amplamente coerente.

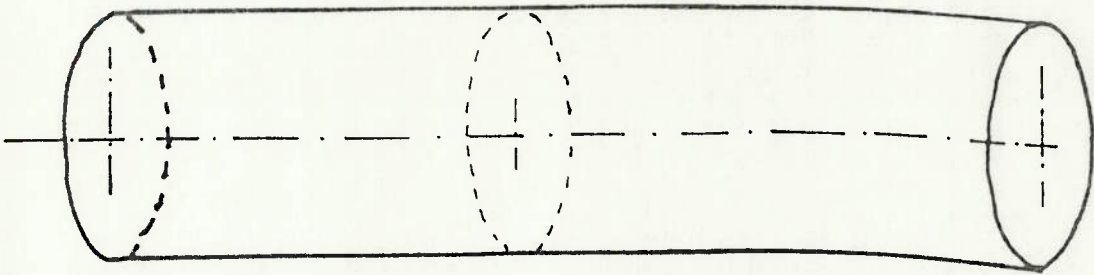
d) A semelhança entre Bryant e Kendrick, descrita em b) acima, não ocorre para cilindros muito curtos e  $n$  da ordem de 2 ou 3. Podemos ignorar este fato por duas razões: - o projeto da estrutura sempre é feito para o maior compartimento, uniformizando-se os escantilhões em todo o submersível, mesmo para compartimentos curtos, a maximização de  $\sigma_f$  não ocorre nestes valores  $n = 2$  ou 3.

- compartimentos longos estarão sempre mais sujeitos aos efeitos da falta de circularidade, uma vez que a maximização de  $\sigma_j$  ocorre para  $n = 2$  ou  $3$ ; sob os quais existe mais probabilidade de ocorrência grandes amplitudes para a imperfeição inicial. Já em compartimentos curtos a maximização ocorre para  $n = 4$  ou  $5$ , sob as quais, provavelmente, as amplitudes são menores.

A imperfeição b) citada ("desalinamento do eixo do submarino, como pode ser visto na figura 2.6), com todas as secções transversais perfeitamente circulares, pode ser englobada neste caso associando-se a um valor de  $w$  (como pode ser visto na equação II.12) onde  $n=1$ . Nestas condições teremos  $\sigma_j = 0$  (da equação II.15). Portanto, quanto às cavernas, esta imperfeição não é considerada, logicamente dentro de valores razoáveis, onde se possam eliminar efeitos que são considerados desprezíveis.

As imperfeições c) e d), citadas no início deste capítulo, influem, respectivamente, no colapso do casco entre cavernas e na flambagem lateral de cavernas e fogem ao escopo deste trabalho.

Figura 2.6 - Desalinhamento do eixo de um submersível



## II.3 - CÁLCULO DO INÍCIO DO ESCOAMENTO

Os critérios de projeto adotam um valor da máxima falta de circularidade que o casco de um submarino pode apresentar, após a sua fabricação. A partir desse valor, associando-se o modelo matemático indicado pelo critério de projeto adotado, projeta-se o arranjo estrutural, de tal forma que o início do escoamento do flange das cavernas se dê a uma profundidade compatível com o requisito da profundidade máxima de operação do submarino. Este cálculo do início do escoamento no flange das cavernas do casco resistente de submarinos, baseia-se que esta falha ocorre na profundidade em que se tenha:

(II.16)

$$\sigma_c + \sigma'_c = \sigma'_c$$

(ver figura 2.1), onde:

$\sigma_c$  - é a tensão de compressão nas cavernas. Dada por Von Sanden e Gunther [6], com  $R_c$  (rato da linha neutra do perfil isolado), no lugar de  $R$  (rato da superfície média do casco resistente).

$$\sigma_c = \frac{p \cdot Q \cdot R_c^2}{(A + B \cdot L)}$$

(II.17)

$\sigma'_c$  - é a tensão de flexão nas cavernas devido à falta de circularidade do casco resistente.

Considerando o valor máximo da equação (II.15.a) vem:

(II.18)

$$\sigma'_c = \frac{R_c^2}{(n^2 - 1) E c B_0} \times \frac{P_{cr} - p}{p}$$



O início do escoamento ocorre quando  $\sigma_l = \sigma_y$ . Portanto:

$$\sigma_y = \frac{P_{col} Q R_s^2}{(A + Bt)} + \frac{R_c^2}{E c B_o} \times \frac{P_{cr}^n - P_{col}}{P_{col}}$$

(II.19)

onde:

$P_{col}$  - é a pressão que dá início ao escoamento (pressão de colapso)

II.4 - MODELO ANALÍTICO PARA ANÁLISE DOS EFEITOS DA FALTA

DE CIRCULARIDADE REAL

No item II.2 apresentou-se a formulação para o estudo das tensões de flexão na estrutura, para uma forma padrão de falta de circularidade, segundo o desenvolvimento apresentado por Kendrick [5], foi também o primeiro a propor que este resultado fosse, extrapolado para o caso em que a falta de circularidade inicial tivesse uma forma geral:

$$w = \sum_{r=1}^{\infty} A_r F_r(x, \theta) \tag{II.20}$$

$$w_1 = \sum_{r=1}^{\infty} A_r \frac{p - p_{cr}}{p} F_r(x, \theta) \tag{II.21}$$

onde:

$A_r$  - é a amplitude do r-ésimo modo da decomposição de falta de circularidade real;  
 $F_r(x, \theta)$  - é a forma do r-ésimo modo;  
 $p_{cr}$  - é a pressão crítica de flambagem global;  
 $p$  - é a pressão externa.

Admitindo-se que as anteparas, pela grande rigidez no seu próprio plano, sejam perfeitamente circulares, pode-se utilizar a decomposição de falta de circularidade inicial em série de Fourier, para todo o comprimento de comprimento  $L_a$  (como pode ser visto na figura 2.6 e na equação II.11), dada por:

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} B_{o mn} \cos n\theta \sin \left[ \frac{m L_a}{m \pi x} \right] + D_{o mn} \sin n\theta \sin \left[ \frac{m L_a}{m \pi x} \right] \tag{II.11}$$

A partir das equações II.20, II.21, II.11 usando o mesmo procedimento do item II.2, para computo da tensão de flexão no flange das cavernas, vem:

$$\sigma_r^j = \frac{E c}{R_z} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=2}^{\infty} (n^2 - 1) \frac{P_{cr_{mn}} - P}{P} \times \left[ B_{0mn} \cos n\theta + D_{0mn} \sin n\theta \right] \sin \left( \frac{L^a}{m \pi x} \right) \quad (II.22)$$

onde:  $B_{0mn}$ ,  $D_{0mn}$  - são as amplitudes das componentes  $m, n$  da série de Fourier;  $L^a$  - é a distância entre anteparas.

Nota-se que em II.22, não aparecem os termos em  $n=0$  e  $n=1$ , pois não implicam no aparecimento de tensões de flexão. O valor de  $\sigma_r^j$  é variável, de acordo com II.22 tanto circumferencial como longitudinalmente.

O casco resistente, como parte da chapa colaborante das cavernas, terá uma tensão de flexão dada por II.15.b:

$$\sigma_r^c = \sigma_r^c \quad (II.15.b)$$

Tendo o levantamento da falta de circularidade global  $w(x, \theta)$ , as amplitudes  $B_{0mn}$  e  $D_{0mn}$  das componentes da série de Fourier são dadas por:

$$B_{0mn} = \frac{2 \lambda^a}{L} \int_0^L \int_0^{2\pi} w(x, \theta) \sin \left( \frac{L^a}{m \pi x} \right) \cos n\theta \, dx \, d\theta \quad (II.23)$$

$$D_{0mn} = \frac{2 \lambda^a}{L} \int_0^L \int_0^{2\pi} w(x, \theta) \sin \left( \frac{L^a}{m \pi x} \right) \sin n\theta \, dx \, d\theta \quad (II.24)$$

Nos processos de medição de falta de circularidade, ela é tomada por pontos discretos, não se conhecendo sua expressão analítica. Portanto, as integrais II.23 e II.24, devem ser executadas numericamente.

Portanto, estando o casco resistente fabricado, a forma mais precisa de conhecer-se o valor efetivo das tensões  $\sigma_r$ , consiste em efetuar-se a medição da falta de circularidade de todo o compartimento estrutural, de comprimento  $L_0$ , partindo-se para utilização da equação (II.23).

$$\lambda = \begin{cases} 1/4 & \text{para } m=0 \text{ e } n=0 \\ 1/2 & \text{para } n=0 \text{ e } m>0 \\ 1 & \text{para } m>0 \text{ e } n>0 \end{cases}$$

onde :



## CAPÍTULO III

## PROCESSOS DE MEDIÇÃO

## III.1 INTRODUÇÃO

Como já visto, a máxima falta de circularidade, que deverá ocorrer no casco resistente, é adotada durante o seu projeto. Deste modo, durante a fase de fabricação, e mesmo durante a operação, deve-se verificar se este requisito está sendo atendido. Portanto, devem-se elaborar processos para medir essa falta de circularidade. Os processos de medição de falta de circularidade são os mais diversos possíveis, sendo que a Marinha do Brasil tem utilizado três desses processos, os quais são:

- Processo do Compasso;

- Processo dos Jig;

- Processo da Régua em Arco.

Estes processos são descritos mais detalhadamente nos itens que se seguem.

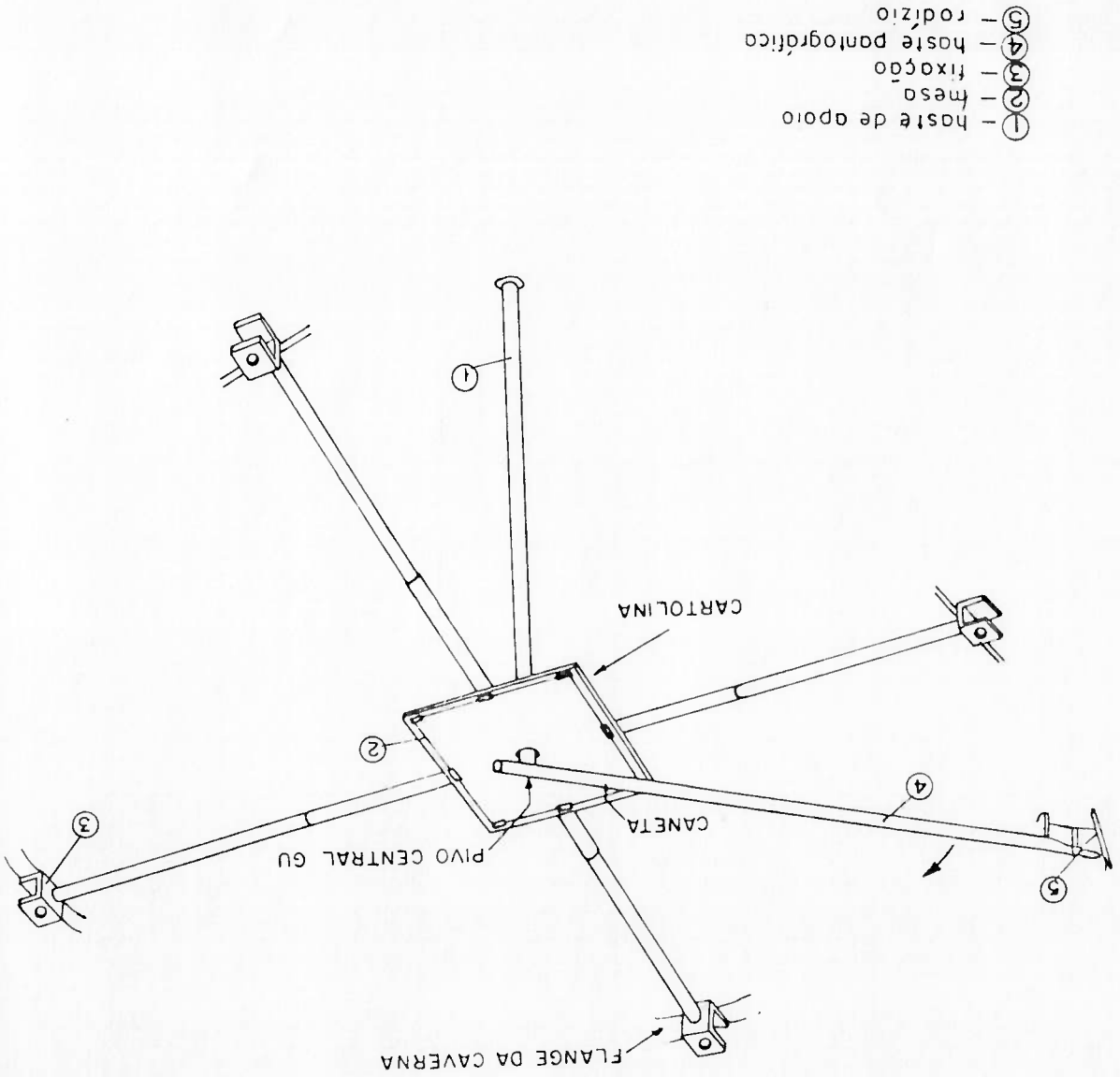
O instrumento de medida, aqui denominado simplesmente por compasso, (ver figura 3.1), trata-se de um tipo de pantógrafo, com arranjo tal que permite sua fixação nas subsecções do casco resistente, e destina-se à obtenção do traçado gráfico do contorno interno da secção transversal do casco resistente. Para tanto, ele possui uma haste giratória, com ampla liberdade de movimentação radial, própria para acompanhar a forma da secção quando a extremidade da haste for obrigada a percorrer circumferencialmente a superfície interna do casco. O traçado do contorno é obtido através de uma caneta montada na outra extremidade da haste.

### III.2.1 - DESCRIÇÃO DO COMPASSO

### III.2 - PROCESSO DO COMPASSO

O processo de medição do compasso é um procedimento para medição de falta de circularidade interna de subsecções do casco resistente de submersíveis, que utiliza o instrumento citado para a obtenção do traçado do contorno da secção transversal a ser medida e emprega um conjunto de gabaritos circulares para ajuste do círculo ótimo e, portanto, para a determinação da falta de circularidade. Deve-se frisar o fato de que o traçado do contorno da secção é globalmente obtido com redução de escala, porém, a falta de circularidade do mesmo traçado está em verdadeira grandeza. Portanto, a partir do processo do compasso, obtêm-se por leitura direta a máxima falta de circularidade medida.

Figura 3.1 - Compasso instalado em uma seção de um submersível



### III.2.3 - MÉTODO DE ANÁLISE DAS MEDIÇÕES OBTIDAS COM O COMPASSO

Como já foi descrito resumidamente no item III.2.2, a análise das medições, e as consequentes faltas de circularidade obtidas com o compasso, são derivadas do resultado da superposição dos gabaritos circulares, no traçado obtido pelo compasso.

Os gabaritos circulares são constituídos por três círculos concêntricos, com diâmetros  $D$ ,  $D + 20$  e  $D + 40$  mm, desenhados cuidadosamente em cores diferentes sobre uma folha de papel poliéster peso duplo (espessura 75 microns).

Estes gabaritos destinam-se ao ajuste do "círculo ótimo". Assim sendo é necessário dispor-se de gabaritos que cubram a gama necessária de diâmetros, com diâmetros de 1 em 1 mm. Na tabela III.1 tem-se um exemplo de um conjunto de gabaritos.

Os gabaritos em papel poliéster podem, opcionalmente ser utilizados conjuntamente com uma placa de vidro que, posicionada sobre os mesmos evitará que estes se enrolem, prejudicando o ajuste. Como será necessário marcar a posição do centro ótimo, a placa de vidro deverá possuir um grande furo central, como pode ser visto no esquema da figura 3.2.

O ajuste dos gabaritos circulares ao traçado ótimo é realizado da seguinte maneira:

1) Sobrepoem-se sucessivamente os gabaritos à folha de registro, que deverá estar fixada à mesa, deslocando-os sobre o traçado até determinar um círculo que cumpra as seguintes condições:

a) que apresente um valor mínimo, entre todos os gabaritos, para a falta de circularidade entre o traçado e o círculo do gabarito;

b) que fique numa posição tal, em relação ao traçado, que a falta de circularidade máxima externo seja igual à falta de circularidade máxima interna;



Tabela III.1 - Gabaritos circulares utilizados pelo método do compasso

DIAMETROS (mm)		(1)	(2)	(3)
GABARITO		325	345	365
	1	326	346	366
	2	327	347	367
	3	328	348	368
	4	329	349	369
	5	330	350	370
	6	331	351	371
	7	332	352	372
	8	333	353	373
	9	334	354	374
	10	335	355	375
	11	336	356	376
	12	337	357	377
	13	338	358	378
	14	339	359	379
	15	340	360	380
	16	341	361	381
	17	342	362	382
	18	343	363	383
	19	344	364	384

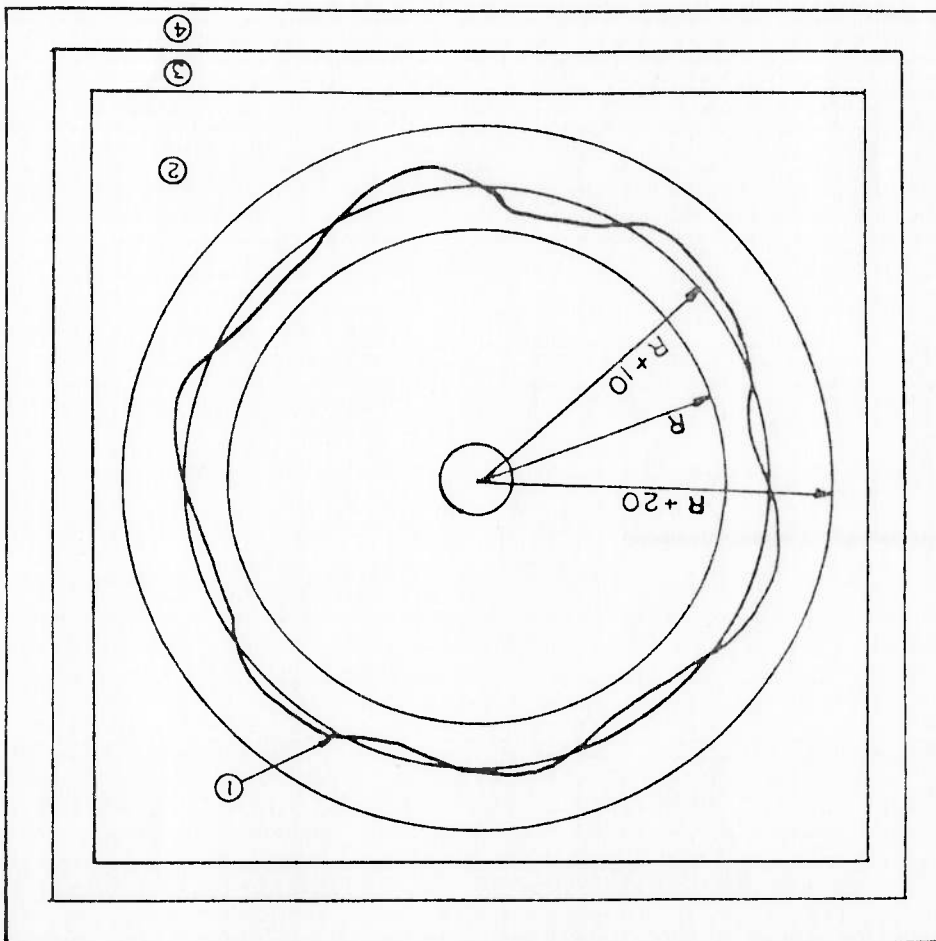
(1) - Desenhados em verde

(2) - Desenhados em vermelho

(3) - Desenhados em preto

Figura 3.2 - Esquema de utilização dos gabaritos circulares

- ① - contorno
- ② - placa de vidro e turo central
- ③ - papel poliester e gabaritos
- ④ - cartolina e traçado



2) O círculo gabarito determinado conforme o item 1) acima, deverá ser adotado como círculo ótimo;

3) Determinado o raio do círculo ótimo, transfere-se o centro do mesmo à folha de registro, com a ponta seca de um compasso. Marca-se o centro transferido com tinta nanquim.

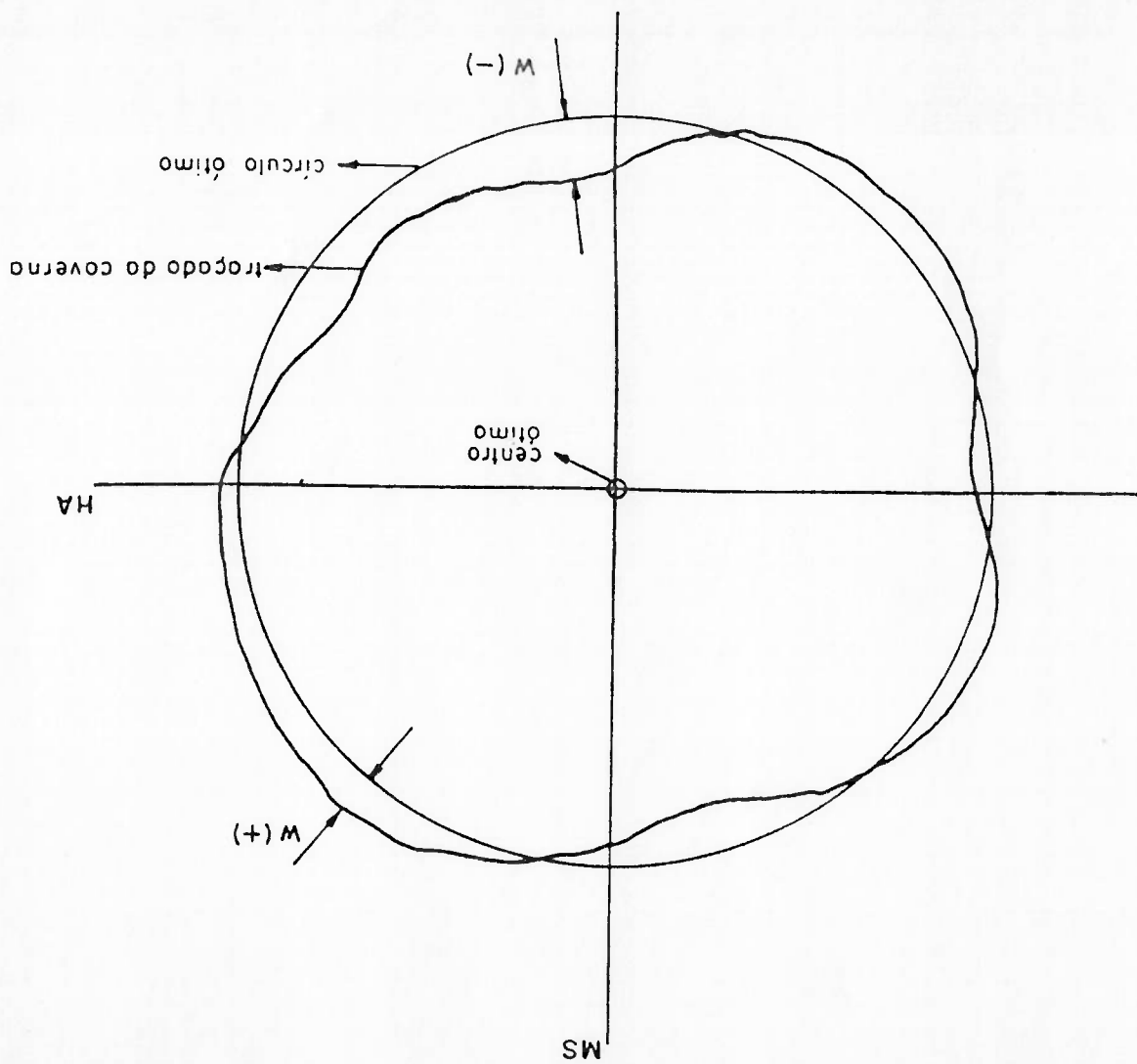
4) Com o compasso posicionado neste centro, (centro ótimo), trace-se com caneta nanquim o círculo ótimo na folha de registro;

5) Localiza-se visualmente os pontos onde ocorrem as máximas faltas de circularidade, (externas ou internas ao círculo ótimo), numerando-as e tracando linhas radiais, a partir do centro do círculo ótimo, em direção a esses pontos, sendo escolhidos um número suficiente de pontos para que não exista qualquer dúvida sobre se, efetivamente, entre eles encontram-se os pontos de máxima falta de circularidade;

6) Com o auxílio de uma escala, (menor divisão = 0,50 mm), medem-se as máximas faltas de circularidade, na direção radial do círculo ótimo. A mesma falta de circularidade externa, deve ser atribuído o sinal positivo (+), e a mesma falta de circularidade interna deve ser atribuído o sinal negativo (-). Estes valores são definidos como a máxima falta de circularidade da caverna em análise.

Na figura 3.3, a seguir, têm-se um exemplo de uma análise e os resultados obtidos.

Figura 3.3 - Resultados de uma análise de uma caverna pelo método do compasso





III.3 - PROCESSO DO JIG

III.3.1 - DESCRIÇÃO DO JIG

O Jig, ou dispositivo para medição de falta de circularidade externa, que é posicionado nas extremidades das secções ou subsecções a serem medidas, consta, em sua essência, de um anel tornado rígido por um sistema radial de tirantes, (ver figura 3.4).

No anel é instalado um conjunto de 24 placas deslocáveis radialmente com um furo central, sendo estas placas posicionadas de 15 em 15°.

Os centros das 24 placas, são ajustados com o auxílio de um cintel, fazendo com que todos eles pertençam a uma mesma circunferência. O cintel é um equipamento composto por um perfil de alumínio, do tipo retangular, no qual são instaladas duas pontas secas móveis, como pode ser visto um esquema na figura 3.5. Por estes furos passam as linhas de nylon que serão utilizadas como referência para registro dos "off-sets" das estações (pontos de medição) das cavernas.

III.3.2 - PROCESSO DE MEDIÇÃO COM O JIG

Este processo de medição da falta de circularidade externa de secções ou subsecções do casco resistente de submersíveis, consiste em posicionar nas extremidades de secção ou subsecção do casco, os dois Jigs, concêntricos com a geratriz da secção ou subsecção (ver figura 3.4).

Entre os Jigs, são esticados 24 fios de nylon, passando pelos furos centrais das placas deslizes, materializando-se linhas paralelas ao eixo longitudinal da secção a ser medida, sendo estes denominados geratrizes cilíndricas. Mede-se a distância radial  $d_1$  entre a linha de nylon e a superfície externa do casco para todas as cavernas da secção, ao longo da sua circunferência, nas 24 posições em que há a passagem de uma geratriz cilíndrica, e sempre de modo que a escala utilizada fique perpendicular à superfície do casco medido.

Fig

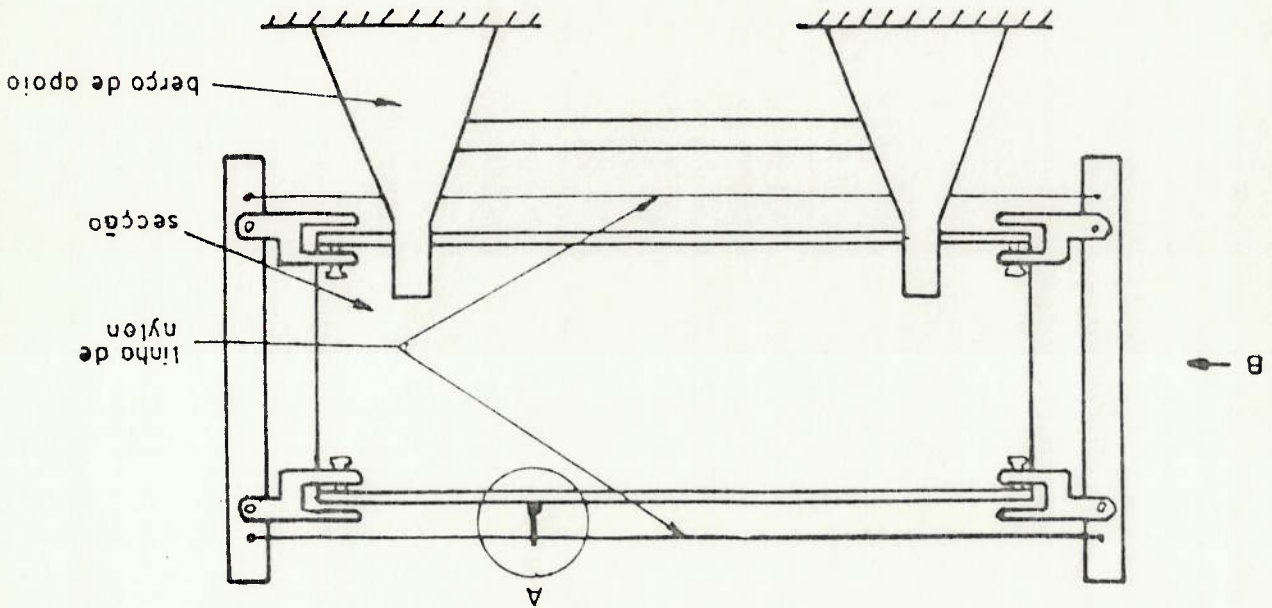
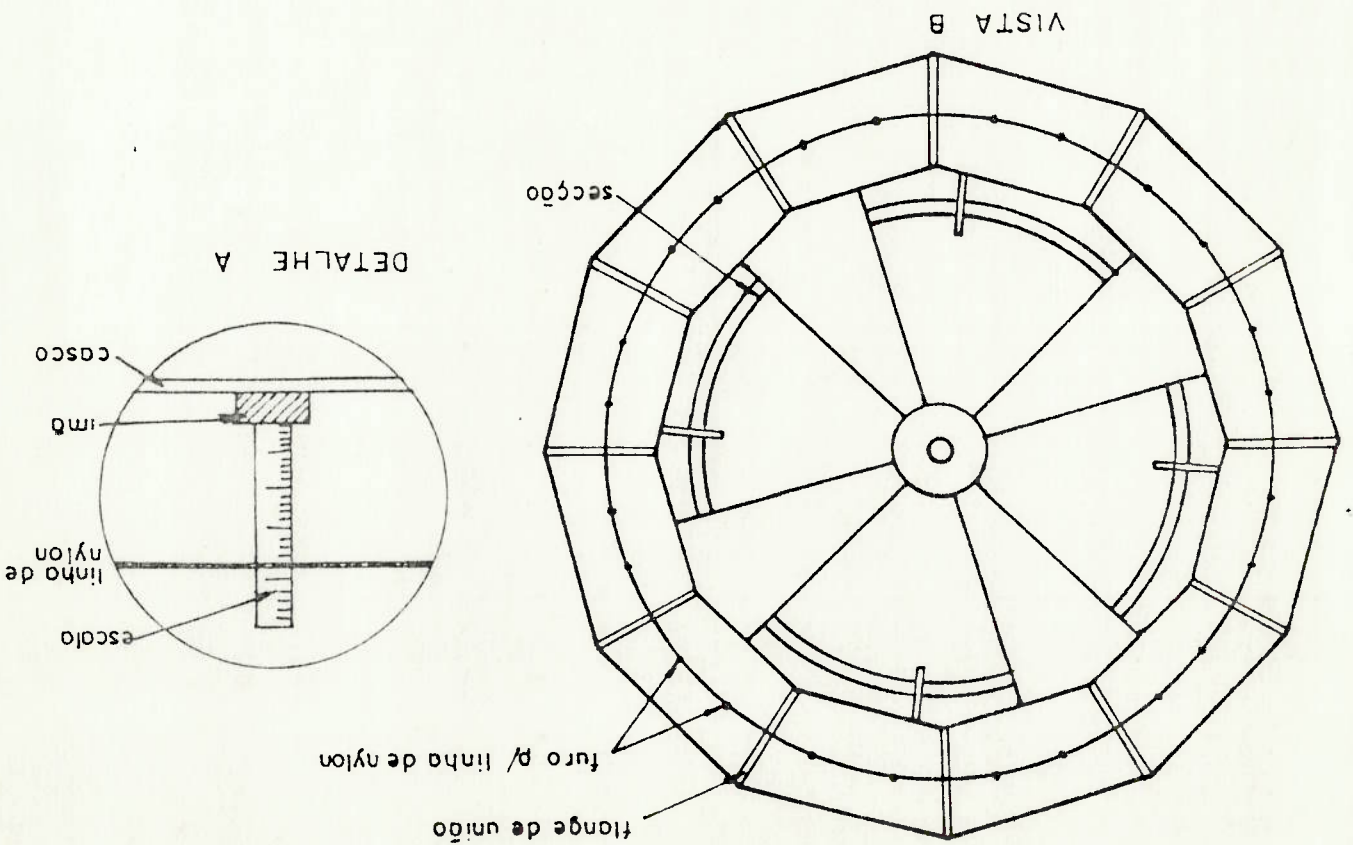


Figura 3.4 - Esquema da montagem do processo do Jig e detalhamento dos equipamentos auxiliares utilizados

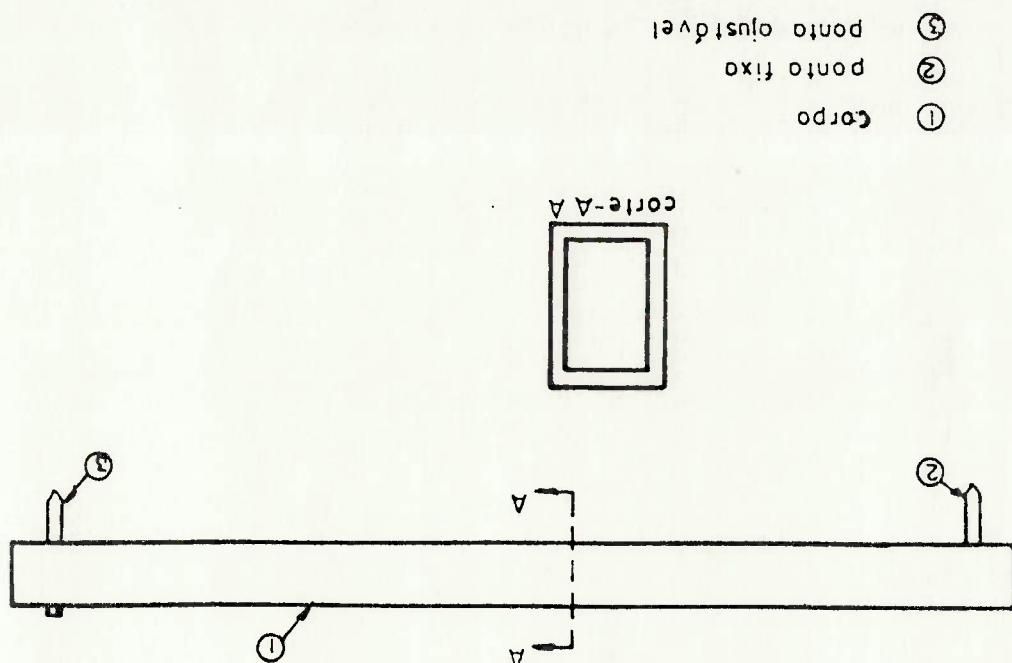
Esta medição é executada com uma escala associada a um ímã, conforme pode ser visto no detalhe a) da figura 3.5, que mostra um esquema da montagem do processo de medição de falta de circularidade com o jig.

As placas deslçáveis dos jigs devem ser posicionadas com o auxílio de um cintel, de forma que os furos centrais destes estejam localizados em um círculo perfeito de raio conhecido. O centro deste círculo corresponde ao centro do jig, que deverá estar alinhado com o centro da secção transversal localizada na extremidade da secção à qual o "jig" está montado

A partir dos valores das distâncias radiais medidas para cada caverna da secção, e através de um processo geométrico, é calculada a falta de circularidade de cada uma das cavernas da secção. Este processo geométrico utilizado, será detalhadamente descrito no item a seguir.



Figura 3.5 - Cintel utilizado no processo do Jig





## III.3.3 - MÉTODO DE ANÁLISE DAS MEDIÇÕES OBTIDAS COM O JIG

Para a análise das medições executadas pelo processo do jig, utiliza-se um procedimento matemático de cálculo da falta de circularidade do casco resistente, a partir das distâncias radiais medidas entre as linhas geratrizes e o casco. Este procedimento matemático baseia-se na avaliação das coordenadas geométricas de cada um dos pontos ou estações onde foram tomadas as medidas. A determinação dessas coordenadas é feita da seguinte forma:

$$R_i = R_c - D_i$$

$$x_i = R_i \sin \theta_i$$

$$y_i = R_i \cos \theta_i$$

onde:

$D_i$  - é a distância medida entre a estação  $i$  e o círculo de referência das geratrizes;

$R_i$  - é o raio da estação  $i$ , em relação ao centro das geratrizes;

$R_c$  - é o raio de referência das geratrizes cilíndricas;

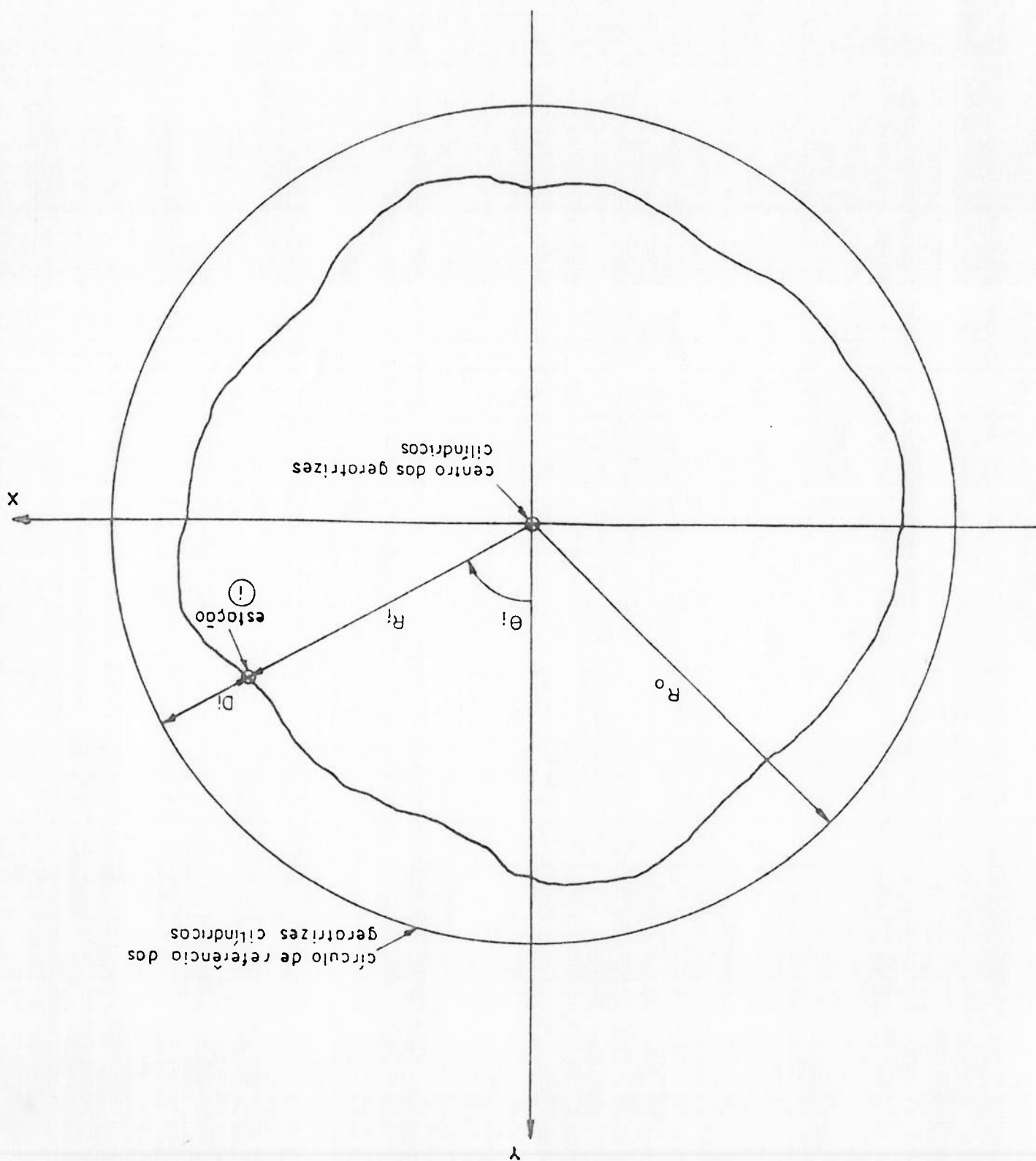
$\theta_i$  - é a posição angular da estação  $i$  em relação ao sistema cartesiano, definido na figura 3.6,

cujas origens e o centro das geratrizes cilíndricas;

$x_i, y_i$  - são as coordenadas cartesianas da estação  $i$ , em relação ao sistema de eixos indicados na figura 3.6;

De posse destas coordenadas, calcula-se o centro médio e o raio médio da secção, utilizando-se as seguintes formulações:

Figura 3.6 - Procedimento matemático utilizado na análise



O centro médio e o raio médio definem um círculo perfeito, em relação ao qual, podem ser medidos os desvios radiais de todas as estações de medição, sendo que, estes, em seu conjunto, são a primeira solução para a falta de circularidade da secção. No entanto, a solução que se procura é aquela em relação ao centro ótimo e ao raio ótimo. Executa-se assim, uma busca, alterando-se tanto o centro, como raio do círculo perfeito, até definir-se este centro e raio ótimos.

(III.5)

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

formulação:

O raio médio da secção é obtido através da seguinte

(III.4)

$$R_i = \sqrt{(x_i)^2 + (y_i)^2}$$

sendo o raio definido por:

(III.3)

$$x_i' = x_i - \bar{x}$$

$$y_i' = y_i - \bar{y}$$

Tomando o centro médio como centro de um novo sistema de coordenadas, pode-se escrever as coordenadas cartesianas das estações de medição neste novo sistema da forma:

das geratrizes;  
sistema cartesiano que tem como origem o centro, no  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  - são as coordenadas do centro da secção, onde  $n$  - é o número de estações de medição;

onde:

(III.2)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

De forma a automatizar este procedimento de análise de falta de circularidade, para as medições obtidas pelo processo do Jig, incluindo o procedimento de busca do raio e centro ótimos, Buelta [7] desenvolveu o programa CIRSUBDO.



A régua em arco consiste, na sua concepção original desenvolvida no San Francisco Naval Shipyard, JUE [8], em um corpo de régua feito de alumínio, e era basicamente um instrumento de leitura indireta, como pode ser visto na figura 3.7. Não existia nenhum instrumento de medida instalado na régua, sendo necessário um segundo instrumento, no caso um micrômetro, sem escala, colocado na estação a ser medida, conforme pode ser visto no esquema da figura 3.8, sendo posteriormente, retirado para a leitura que era executada com o auxílio de um paquímetro.

#### III.4.1 - DESCRIÇÃO DA RÉGUA EM ARCO

#### III.4 - PROCESSO DA RÉGUA EM ARCO

O processo da régua em arco pode ser utilizado para medição externa ou interna da falta de circularidade, consistindo em posicionar, sequencialmente, em todo contorno de uma secção do casco, uma Régua em Arco (ver Figura 3.9, para o caso de medição externa), especialmente construída para o raio do casco. Marca-se, no casco, a posição de origem 0 (estação 0); posiciona-se, neste ponto, a extremidade da régua: marca-se o ponto 1 (estação 1) e mede-se na outra extremidade da régua (estação 2), a distância  $d_1$ , do círculo da régua ao casco ("off-set" 2). Avança-se a régua para a estação 1 e mede-se a distância na estação 3 ("off-set" 3), e assim sucessivamente, até completar a circunferência, quando a estação 1 terá seu "off-set" medido.

A partir dos valores do "off-set's", através de um procedimento matemático, é calculada a falta de circularidade na secção que foi medida. Este procedimento será descrito em detalhes em um item mais adiante.

#### III.4.2 PROCESSO DE MEDIÇÃO COM A RÉGUA EM ARCO

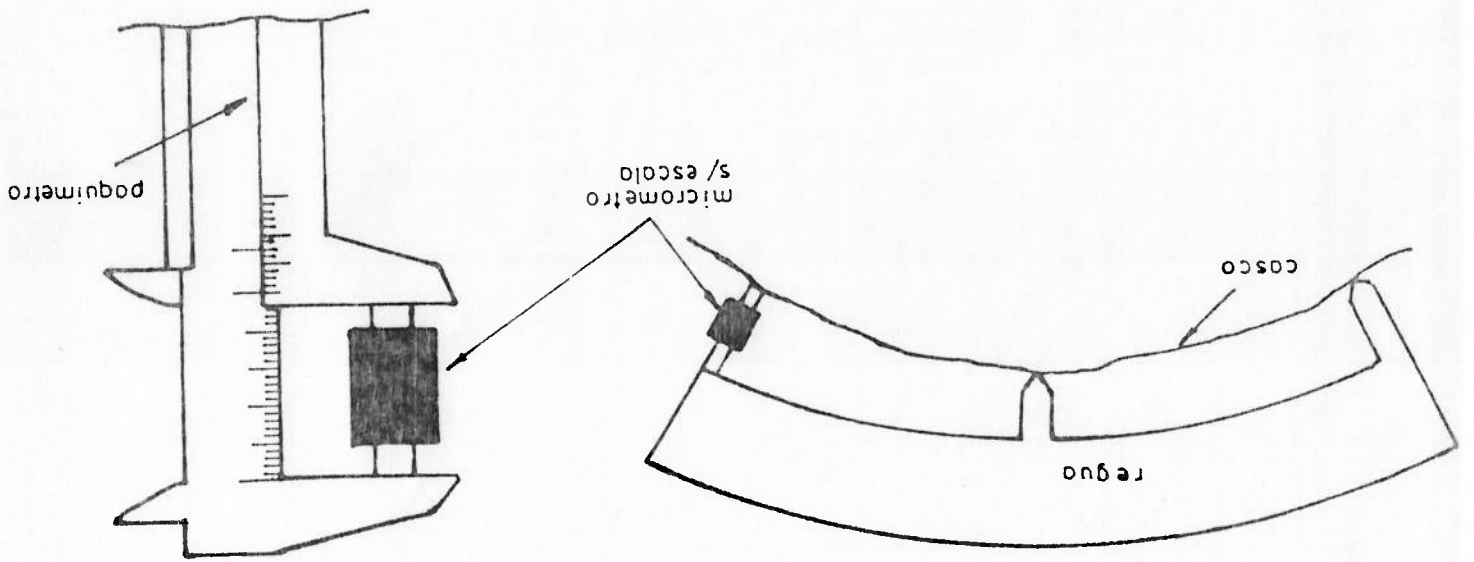
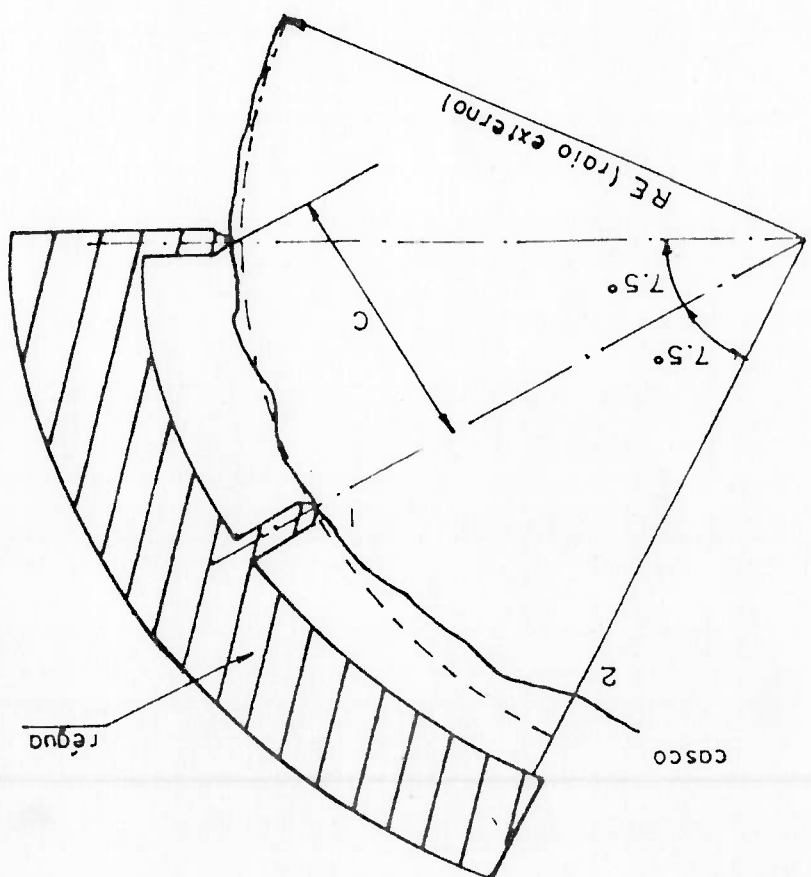


Figura 3.8 - Representação de uma medição com a régua em arco e com o micrômetro sem escala

Figura 3.7 - Representação da régua em arco



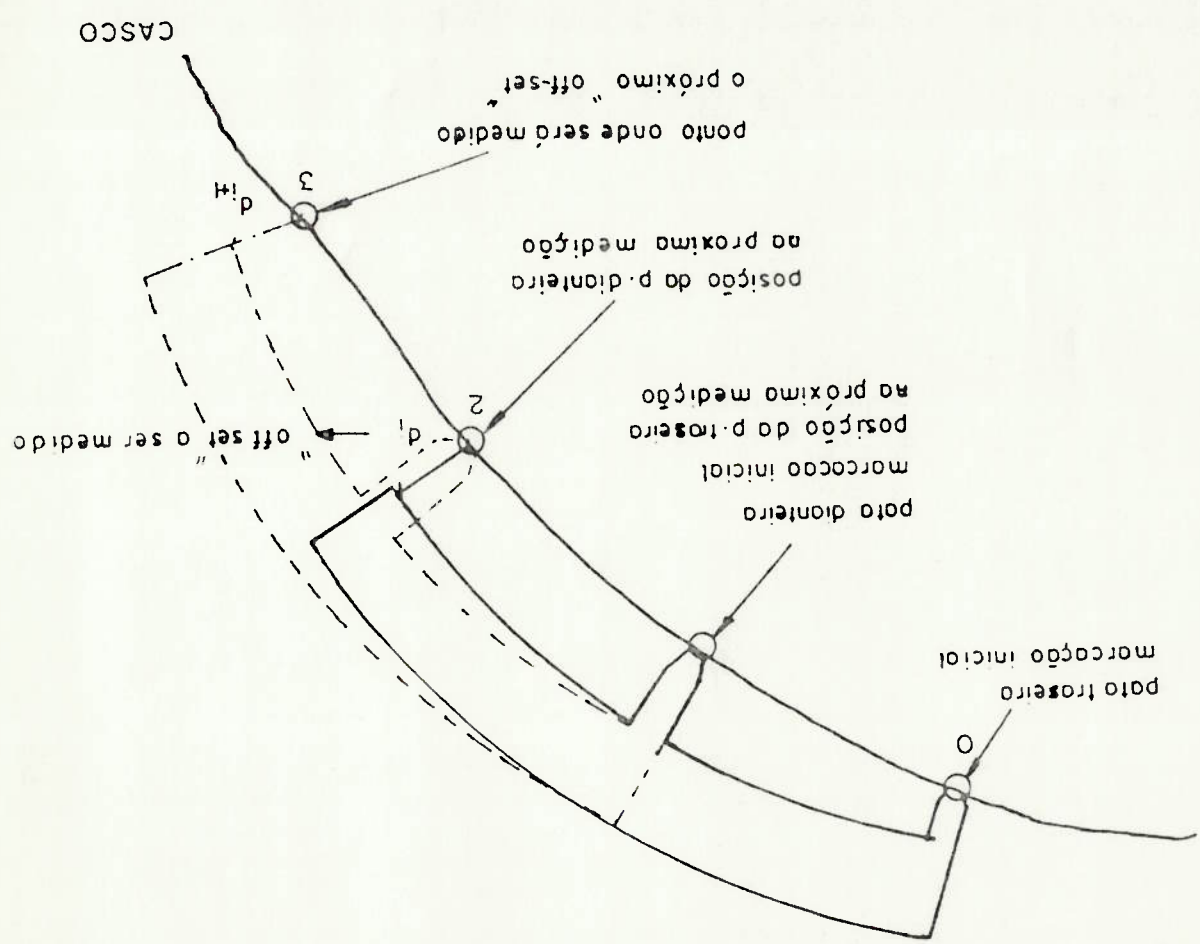


Figura 3.9 - Processo de medição com a régua em arco

## III.4.3 - APERFEIÇOAMENTOS NA RÉGUA EM ARCO

O processo de leitura indireta de off-sets, já descrito no item III.4.1, utilizado pelo San Francisco Naval Shipyard, leva a alguns problemas durante a utilização do mesmo.

Estes problemas consistem, basicamente, na possível inclinação do micrômetro quando do seu posicionamento, ou da inclinação da própria régua em arco, acarretando erros de medição. Esses problemas estão esquematizados nas figuras 3.10.a e b, respectivamente.

De modo a eliminar estes erros inerentes ao processo, Buelta [9], implementou alguns aperfeiçoamentos, que levaram a construção de dois tipos distintos de régua em arco, como pode ser visto a seguir.

## III.4.3.1 - RÉGUA EM ARCO ANALÓGICA

Consiste basicamente, no corpo da régua anteriormente utilizada no San Francisco Naval Shipyard, porém com as seguintes alterações em relação à concepção original:

- Um paquímetro de profundidade (analógico) é preso à extremidade da Régua provendo a leitura direta do "off-set". O detalhe da fixação desse paquímetro pode ser visto na figura 3.11.a.
  - Um apoio lateral impede a inclinação da régua e consequentemente do paquímetro como pode ser visto no esquema da figura 3.11.b.
  - Pastilhas de material duro, (aço cementado), são fixadas às patas da régua, provendo durabilidade e resistência ao desgaste. Essas pastilhas são mostradas na figura 3.11.c.
- Uma representação esquemática da régua em arco analógica, é mostrado na figura 3.12.



Figura 3.10.b - Inclinação do micrômetro

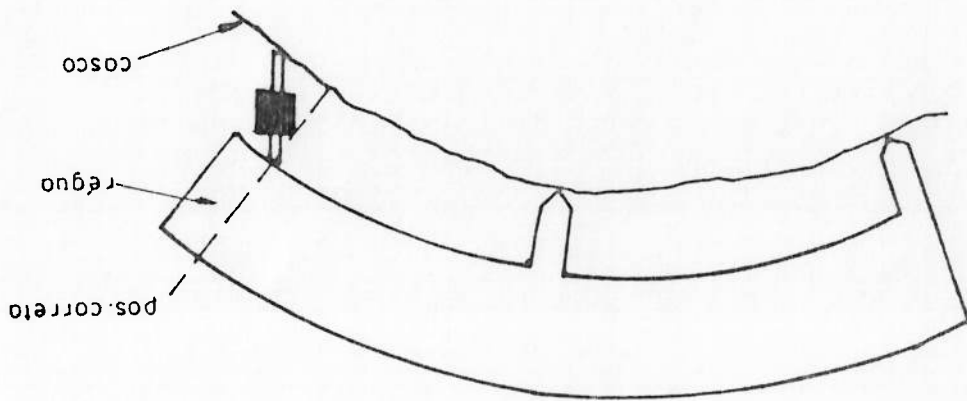
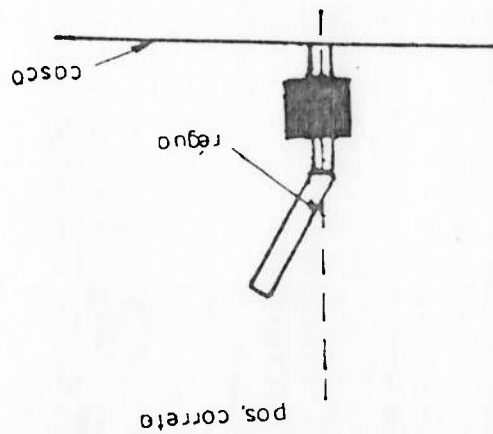


Figura 3.10.a - Inclinação da Régua



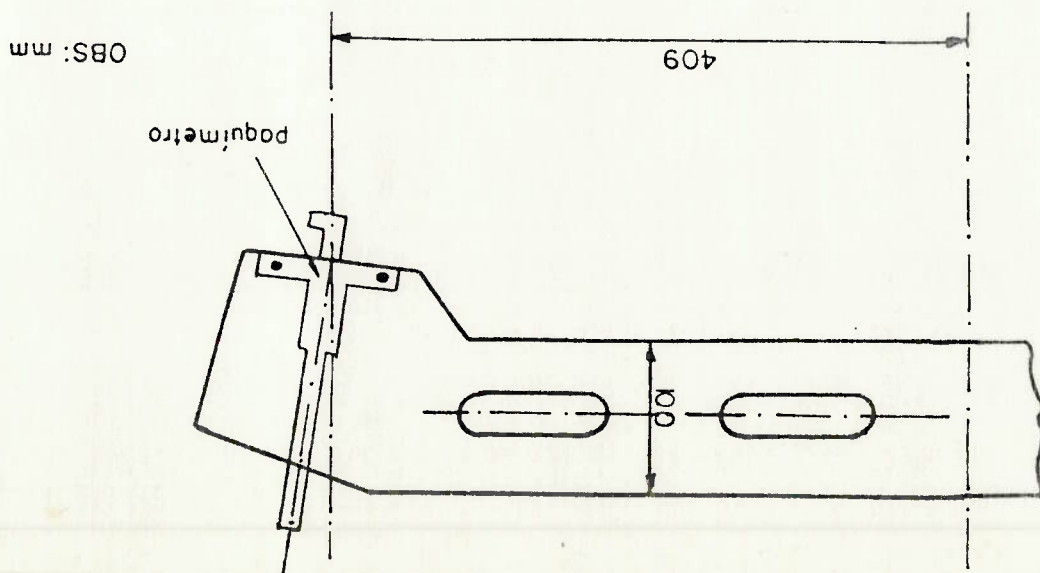


Figura 3.11.a - Fixação do paquímetro de profundidade analógico na régua em arco

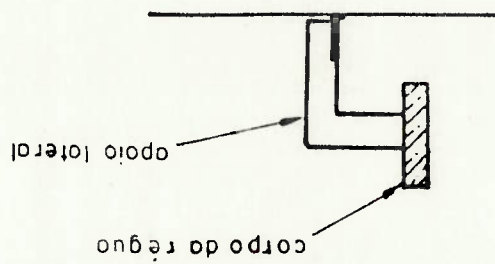


Figura 3.11.b - Detalhe do apoio lateral

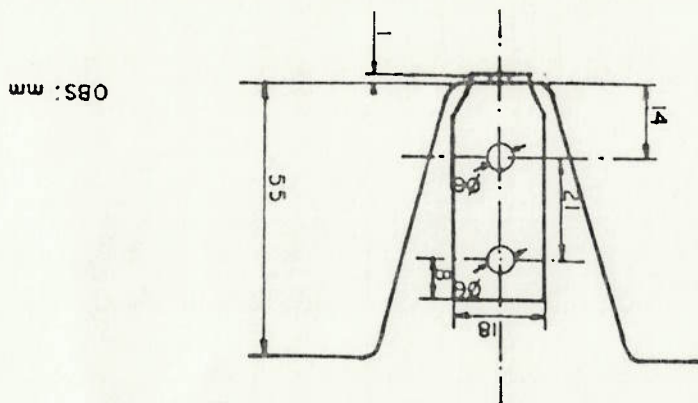
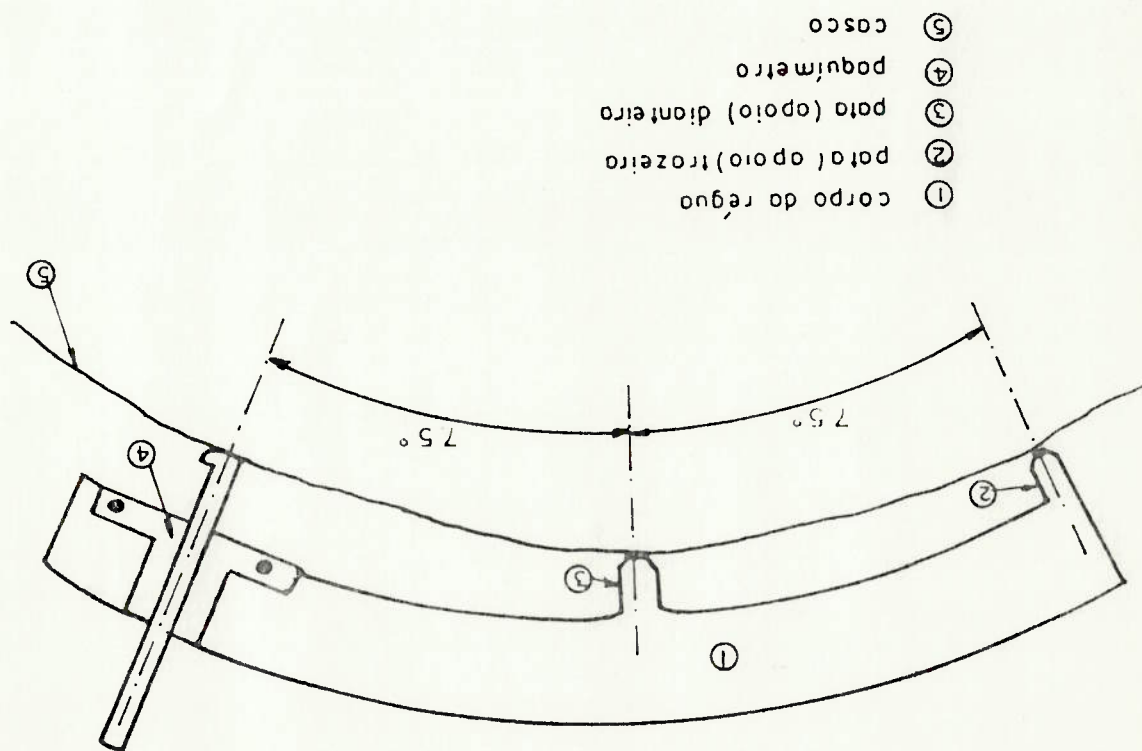


Figura 3.11.c - Detalhe das pastilhas de metal duro

Figura 3.12 - Esquematisação da régua em arco analógica



### III.4.3.2 - RÉGUA EM ARCO DIGITAL

Esta régua nasceu da necessidade de aperfeiçoar-se a visualização, e consequentemente a leitura dos valores dos off-sets medidos. Consiste basicamente na concepção mostrada na figura 3.12, porém com a substituição do paquímetro de profundidade analógico, de um paquímetro alicate digital. O esquema de fixação utilizado para este paquímetro pode ser visto na figura 3.13, assim como o detalhamento da furacão e das peças de fixação do paquímetro à régua podem ser vistos nas figuras 3.14 a e b respectivamente.

Ainda é mostrado na figura 3.15 uma representação esquemática da régua em arco digital.



Figura 3.13 - Esquema de fixação do paquímetro digital à régua

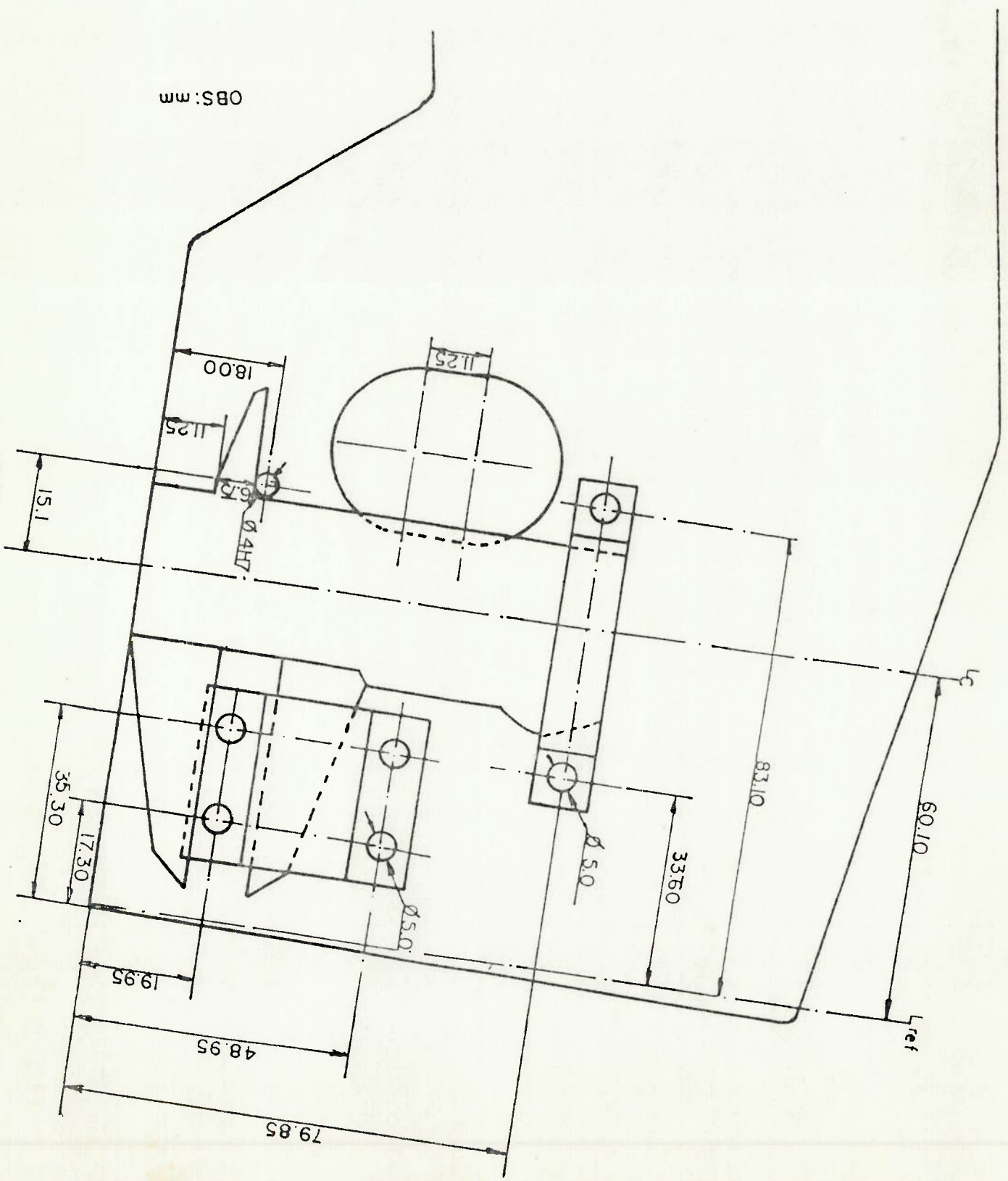


Figura 3.14.a - Esquema de furacão da régua para fixação do paquímetro digital

OBS: mm

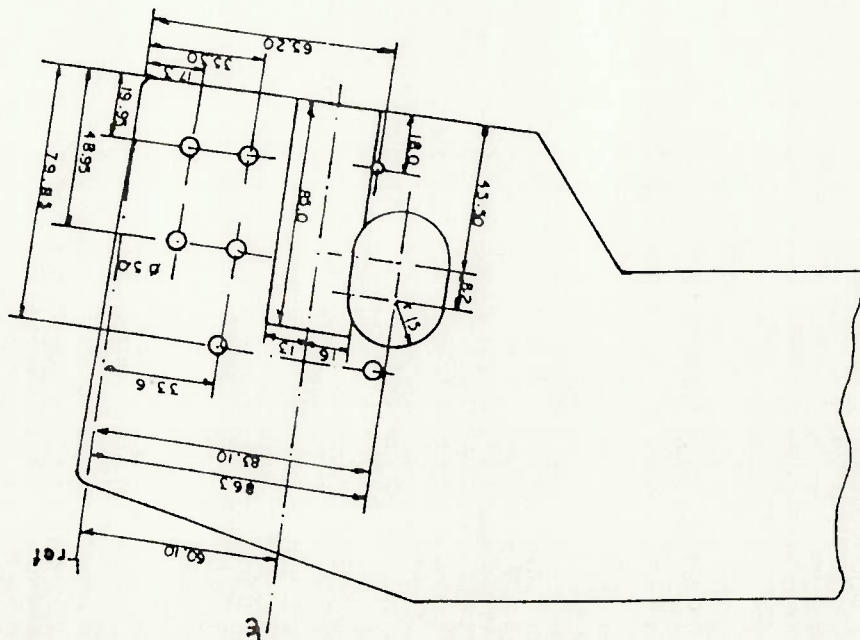


Figura 3.14.b - Esquema das peças utilizadas para fixação do paquímetro digital

OBS: mm

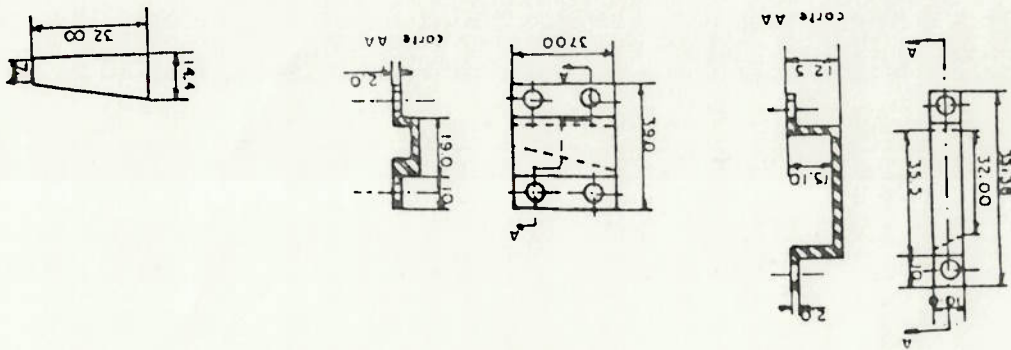
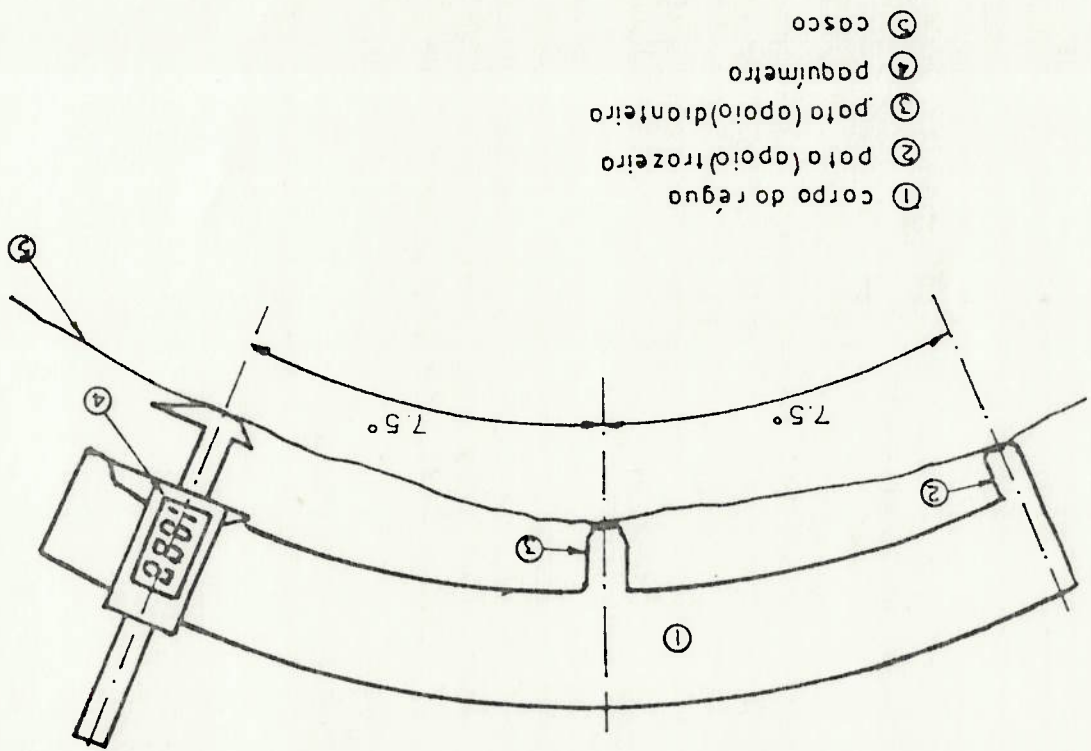


Figura 3.15 - Representação esquemática da régua em arco digital



## III.4.4 - MÉTODO DE ANÁLISE DAS MEDIÇÕES OBTIDAS COM A

## RÉGUA EM ARCO

O procedimento matemático de cálculo da falta de circularidade do casco, a partir das medidas dos "ort-sets", tomadas com o auxílio da Régua em Arco, originalmente proposto pelo San Francisco Naval Shipyard, JUE [8], baseia-se na avaliação de coordenadas geométricas de cada um dos pontos ou estações onde foram tomadas as medidas. Após a obtenção destas coordenadas calcula-se o centro geométrico e o raio médio desta secção.

Para cálculo das coordenadas geométricas dos pontos da secção em estudo utiliza-se o desenvolvimento apresentado a seguir, ressaltando-se para efeito demonstrativo, que se esta trabalhando com um submarino em que as estações estão espacadas de 7,5°.

Na figura 3.16 os pontos  $P_0, P_1, P_2, P_3$ , etc são estações no casco resistente do submarino, nas quais a Régua em Arco será apoiada durante o processo de medição. As distâncias  $P_0P_1, P_1P_2, P_2P_3$  correspondem à corda da régua. O sistema de coordenadas cartesianas XOY, indicado na figura 3.16 em referência será fixo, sendo o ponto O considerado um centro de referência fixo a partir do qual o contorno da secção é calculado.

De forma a definir a posição do ponto 1, indicado na figura 3.16, utiliza-se a relação:

$$x_1 = r - c \operatorname{sen} \alpha_1$$

$$y_1 = r + c \operatorname{cos} \alpha_1$$

sendo  $\alpha_1 = 3,75^\circ$  e  $c$  a corda da régua.

(III.6)



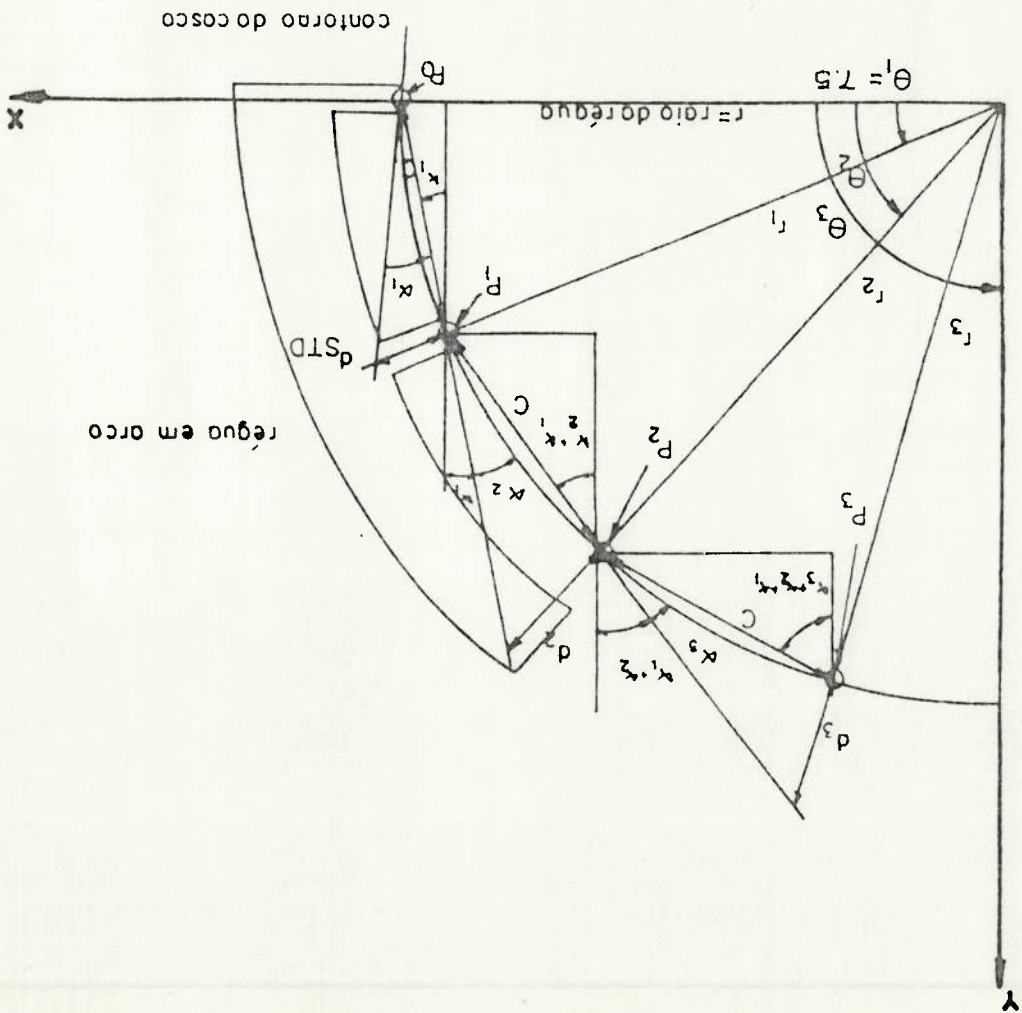


Figura 3.16 - Processo da Régua em Arco

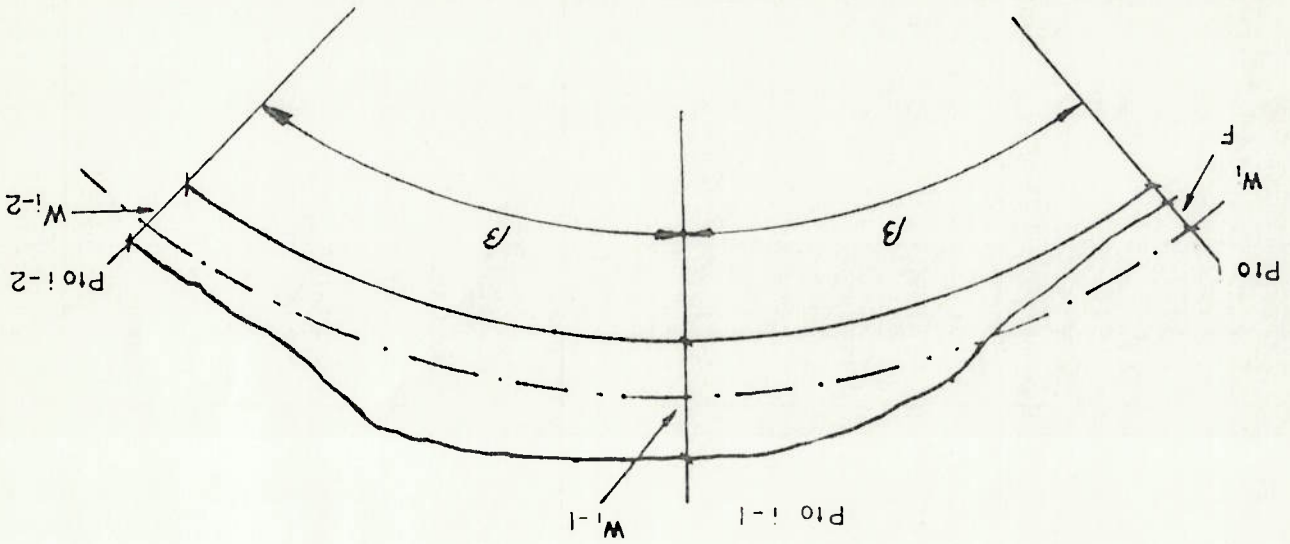


Figura 3.17 - Falta de circularidade das estações de medição

De posse destas coordenadas, calcula-se o raio e a posição angular do ponto  $P_1$  que, são:

$$r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{y_1}{x_1}$$

(III.7)

Por este procedimento de cálculo supõe-se que os pontos  $P_0$  e  $P_1$  estão situados em uma circunferência de raio igual ao raio de projeto da régua.

De acordo com a Figura 3.16, as coordenadas do ponto  $P_2$  estão relacionadas com o ângulo  $\alpha_2$ , sendo este calculado da seguinte forma:

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \frac{c}{\text{sen } 86,25^\circ} + \cos 86,25^\circ \frac{d}{c}$$

e

$$x_2 = x_1 - c \text{ sen } (\alpha_1 + \alpha_2)$$

$$y_2 = y_1 + c \text{ cos } (\alpha_1 + \alpha_2)$$

(III.8)

sendo as coordenadas polares do ponto  $P_2$  calculadas por:

$$r_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{y_2}{x_2}$$

O valor de  $d_2$  corresponde ao valor do "off-set" lido na estação 2 ( $OF_2$ ), menos a diferença entre o "off-set" padrão da régua ( $OF_p$ ) e o valor de  $d_{STD}$ , ou seja:

$$d_2 = OF_2 - (OF_p - d_{STD})$$

onde

$$d_{STD} = \frac{\left( \text{sen } 86,25^\circ \frac{\tan \alpha_1}{c} - \cos 86,25^\circ \right)}{c}$$

Para qualquer ponto  $P_n$ , com  $n \geq 2$ , são válidas as seguintes

relações:

$$\alpha^n = \tan^{-1} \frac{\frac{d}{c} + \cos 86,25^\circ}{\sin 86,25^\circ} \quad \text{(III.10)}$$

(III.11)

$$X^n = X^{n-1} - c \sin(\alpha + \alpha_2 + \dots + \alpha_n)$$

$$Y^n = Y^{n-1} + c \cos(\alpha + \alpha_2 + \dots + \alpha_n)$$

$$r^n = \sqrt{X^n^2 + Y^n^2}$$

$$\theta^n = \tan^{-1} \frac{Y^n}{X^n}$$

No caso em exemplo, de uma régua com ângulo de  $7,5^\circ$ ,

ter-se-ão 48 estações ao longo da circunferência da caverna, ou seja para um ângulo  $\beta$ , ter-se-ão  $\frac{\beta}{360}$  estações ao longo

da circunferência da caverna.

A medição seria "perfeita" e consistente com as hipóteses

assumidas se, ao completar-se a volta, medindo-se o "off-set" da última estação  $n$ , a qual deveria coincidir com a estação inicial,

o, e aplicando-se as formulações III.6 e III.11 se obtivesse:

$$r^n = r \quad \text{(raio da régua em arco)}$$

(III.12)

$$\theta^n = 360^\circ$$

No entanto, devido aos erros de medida que vão se

acumulando, inerentes ao processo de posicionamento da régua e leitura de cada "off-set", as igualdades acima não ocorrem, como

norma.

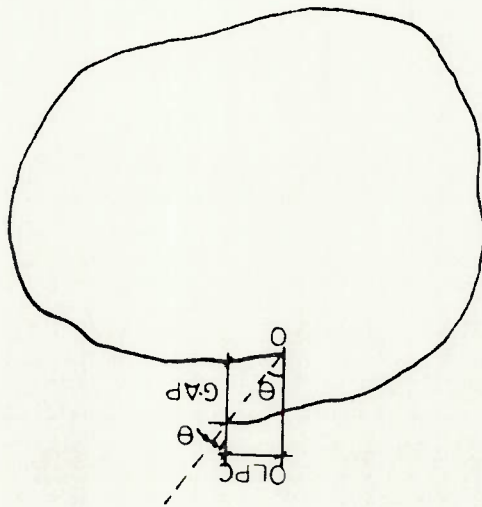
Para  $r^n \neq r$  ocorre o que se denomina GAP e para  $\theta^n \neq 360^\circ$  um OVERLAP, como mostrado na figura 3.18 :

O que se faz nesse instante, é "ajustar" a secção, distribuindo esse OVERLAP e GAP entre todas as estações, mudando suas coordenadas, até obter-se a superposição completa da estação 0 e n, ou seja, tornando-se nulos o GAP e o OVERLAP. Foi constatado em diversas medições já realizadas que, em consequência desse "ajuste", a forma da secção resultante, e daí a falta de circularidade varia dependendo da estação em que se inicia, e consequentemente se termina, a medição.

- OLPC - é a distância horizontal calculada entre a estação (0) e (n);
- GAP - é a distância vertical calculada entre a estação (0) e (n);
- $\theta$  - é o ângulo formado pelas direções radiais (0) e (n).

onde:

Figura 3.18 - Contorno obtido (com GAP e OVERLAP)





Notar que sempre uma estação ("estação 1") não tem seu "off-set" utilizado no cálculo da falta de circularidade. Após a determinação da configuração da secção é calculado o raio médio e o seu centro, e através de um processo de busca direcionada localiza-se a posição do centro que minimiza a máxima falta de circularidade, e assim determina-se a falta de circularidade da secção.

A partir do que foi descrito, e procurando-se trabalhar sempre a favor da segurança, BUELTA [9] propôs a seguinte modificação no processo originalmente utilizado pelo San Francisco Naval Shipyard:

- inicia-se a medição por qualquer estação, medindo-se após o "off-set" da estação  $n$ , também o "off-set" da estação  $(n + 1)$  que corresponde à estação 1;

- processam-se as medições com as seguintes modificações:

- começando pela estação 0, e portanto, não considerando o "off-set" da estação 1, faz-se um primeiro processamento, calculando a máxima falta de circularidade  $w_1$ ;

- começando pela estação 1 (que passa a ser a "estação 0"), e portanto não considerando o "off-set" da estação 2, calcula-se a falta máxima de circularidade  $w_2$ ;

- assim sucessivamente, sempre desconsiderando a estação subsequente à de início, até iniciar na estação  $(n - 1)$  calculando a máxima falta de circularidade  $w_n$ ;

- toma-se para máxima falta de circularidade da secção o valor máximo entre  $w_1, w_2, \dots, w_n$ .

Este procedimento modifica o processo de medição, incluindo os "off-sets" de todas as estações, ou seja, considerando-se a "estação 1". O processo de cálculo que "gira" a configuração inicial, toma o valor máximo da falta de circularidade, estando-se, daí, a favor da segurança, do ponto de vista de aceitar, ou não, a caverna.

Deve-se ressaltar, como desvantagem deste procedimento de análise matemática, a necessidade de "ajuste" da secção em função da distribuição do GAP, que introduz uma ovalização fictícia na secção. Em alguns casos, foi constatado experimentalmente que, esta falta de circularidade fictícia introduzida influencia, significativamente, o valor da falta de circularidade obtida.

Tendo em vista os problemas decorrentes desse ajuste da secção BUELTA e FRANTZA [10], desenvolveram um novo procedimento de cálculo de falta de circularidade a partir dos resultados de medição obtidos com a régua em arco. Este procedimento de cálculo baseia-se na proposição da seguinte relação, como pode ser visto na figura 3.17:

$$F^1 = 2 \cos \beta W^{1-1} - W^{1-2} - W^1 \quad \text{(III.13)}$$

onde:

$\beta$  - é o ângulo da Régua em Arco;

$F$  - é o valor do "off-set" medido na estação  $i$  menos o valor do "off-set" padrão;

$W^i$  - é a falta de circularidade da estação  $i$ , ainda desconhecida;

A equação acima é válida para os  $n$  pontos de medição ao longo da circunferência da caverna medida. A solução do problema consiste na obtenção da solução  $[W]$  de um sistema de equações escrito da forma:

$$\begin{matrix}
 [A] & [W] & [F] \\
 \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & \dots & -1 & a \\ a-1 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 \\ -1 & a-1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & a & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a-1 & \dots & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \\ \dots \\ W_n \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ \dots \\ F_n \end{bmatrix} \\
 n \times n & n \times 1 & n \times 1 & & n \times 1 & & n \times 1
 \end{matrix}$$

onde  $a = \cos \beta$

A solução deste sistema, segundo AIGNER [11], consiste na determinação de um vetor  $[W]$  que

minimize:

$$\left\{ [F] - [A] [W] \right\}^T \times \left\{ [F] - [A] [W] \right\}$$

onde  $[F]$  e  $[A]$  são respectivamente um vetor e uma matriz de

dados.

A matriz  $[A]$  é singular, e a solução deve ser reformulada

da seguinte maneira:

- determinar  $[W]$  tal que  $W_1 = 0$  e  $W_n = 0$ , de forma a

minimizar

$$\left\{ [F] - [A] [W] \right\}^T \times \left\{ [F] - [A] [W] \right\}$$

O problema acima enunciado é equivalente ao seguinte

problema:

- encontrar  $[W^*] = (W_1^*, \dots, W_n^*)$ , que minimize

$$\left\{ [F] - [B] [W^*] \right\}^T \times \left\{ [F] - [B] [W^*] \right\}$$

onde  $[B]$  é uma matriz  $n \times n-2$ , resultante da supressão da

primeira e da última colunas de  $[A]$

Como [B] não é singular, a solução do problema é, AIGNER [111]:

$$\hat{W}^* = \left[ [B]^t \times [B] \right] \times [B]^t \times [F] \quad \text{(III.15)}$$

De posse do vetor  $\hat{W}^*$  obtém-se  $\hat{W}$ , que equivale a :

$$\hat{W} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \hat{W}^* \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{(III.16)}$$

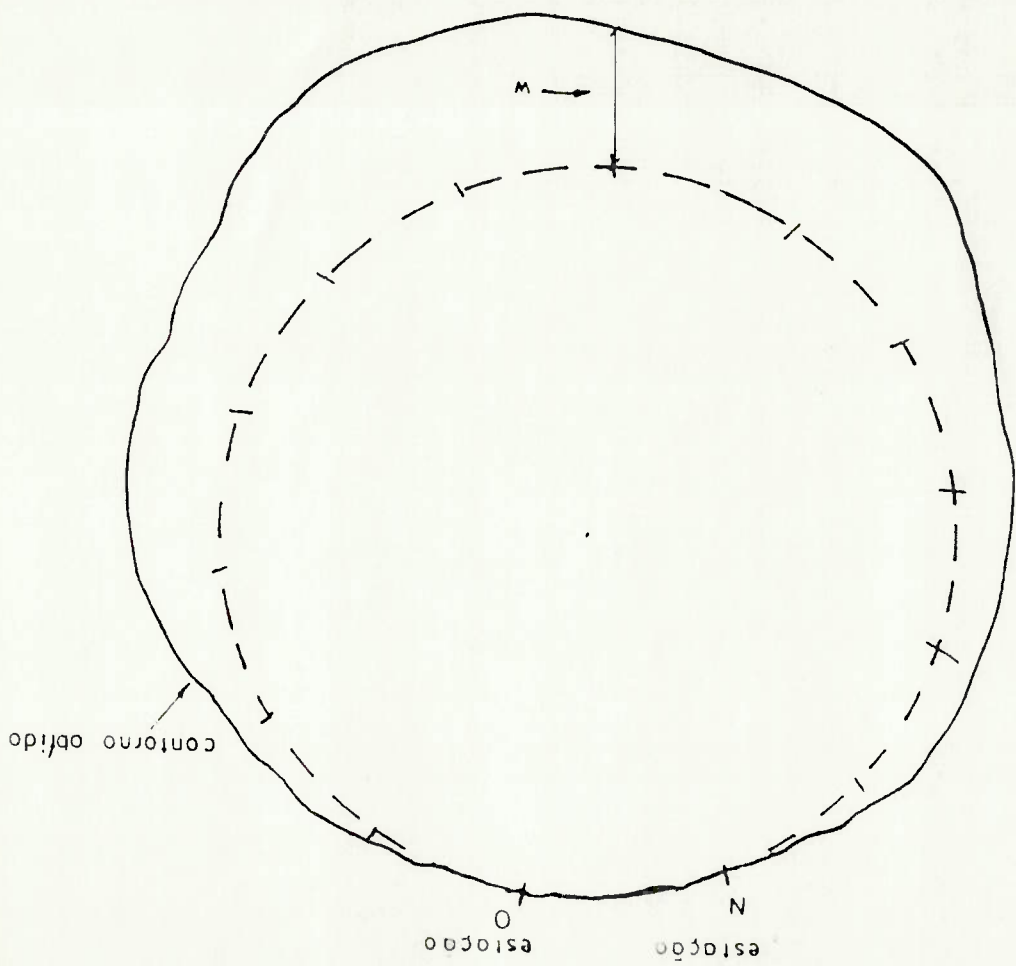
ou seja, obtém-se uma primeira solução para a falta de circularidade da secção, sendo esta representada pelo conjunto de desvios radiais, dos diversos pontos de medição, em relação a um círculo de raio igual ao raio da régua em arco, e que passe pelos primeiro e último pontos de medição, (ver figura 3.19).

Esta primeira solução obtida não pode ser considerada a solução ótima da falta de circularidade, pois existe uma posição relativa entre a secção e um círculo perfeito de raio e centro ótimos, tal que o máximo desvio radial dos pontos da secção em relação a este círculo fique minimizado. Deve-se, portanto, fazer uma busca, alterando-se tanto o centro como o raio do círculo perfeito, até obter-se esse raio e centro ótimos e, portanto, a máxima falta de circularidade, como ela é entendida neste trabalho.

De forma a automatizar tanto a solução do sistema dado em III.14 como a busca da máxima falta de circularidade, foi desenvolvido o programa CIRSUBRO [12].



Figura 3.19 - Representação da primeira solução encontrada



## CAPITULO IV

## PROCESSO DE QUALIFICAÇÃO

## IV.1 - INTRODUÇÃO

A qualificação de um processo de medição busca a determinação da precisão e da confiabilidade deste.

A determinação destes parâmetros, no caso do processo de medição de falta de circularidade de submarinos é de fundamental importância, pois a partir desse conhecimento, podem-se tomar algumas decisões de grande importância em termos de custo, tempo de fabricação ou mesmo de carácter operativo do veículo, tais como: aprovação da subsecção, necessidade de execução de uma análise estrutural, modificação da profundidade máxima de operação do submarino, etc. Esta qualificação é realizada a partir da comparação dos resultados de falta de circularidade obtidos com a utilização de um determinado processo de medição, de uma dada configuração conhecida, com a falta de circularidade verdadeira desta configuração.

Portanto, para tal, foi construído um gabarito circular, ao qual é preso, por intermédio de parafusos, uma chapa simuladora do casco do submarino. Mediante a movimentação dos parafusos dispostos radialmente ao círculo perfeito de referência, ou superfície de referência, é possível imprimir-se uma configuração conhecida à chapa montada no gabarito. Um esquema deste gabarito pode ser visto nas figuras 4.2 e 4.5.

De posse da configuração imposta, determina-se a falta de circularidade verdadeira do gabarito, cujo valor será utilizado para comparação com os valores de falta de circularidade obtidos com a aplicação do dado processo de medição.

Neste capítulo serão abordados os métodos estatísticos utilizados para a qualificação, os procedimentos utilizados para a determinação da configuração imposta ao gabarito, e para a determinação da máxima falta de circularidade medida, para cada um dos processos de medição. Irão ser abordados, também, os problemas encontrados durante a qualificação de cada um desses processos.

## IV.2 - MÉTODOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS

A medição da falta de circularidade, não importando o método pelo qual seja feita, é um procedimento sujeito, necessariamente, a erros de medida. Em trabalhos executados anteriormente, BUELTA e FREITAS [12], verificaram que, em medições repetidas de uma mesma configuração, não se obtém uma frequência elevada de qualquer valor individual de falta de circularidade aparente, ou seja, da falta de circularidade obtida por um processo qualquer de medição. É essa diversidade dos valores de falta de circularidade aparente, mesmo quando se fixam todos os fatores relevantes que influenciam a medição, tais como a equipe que está executando essa medição e a configuração que está sendo medida, que torna a falta de circularidade aparente uma variável aleatória, pois é impossível determinar o valor que ela irá assumir, por mais informações que se tenha sobre a medição que vai ser executada.

Iráo ser apresentados a seguir, os métodos estatísticos utilizados para a qualificação de um processo de medição e para a qualificação de um operador, independente do procedimento de medição utilizado.

## IV.2.1 - QUALIFICAÇÃO DE UM PROCESSO DE MEDIÇÃO

A qualificação consiste, basicamente, em executar repetitivamente, um certo número de medições de uma configuração conhecida, previamente imposta ao gabarito, obtendo-se as diversos valores para a falta de circularidade aparente. Esta como uma variável aleatória, terá uma distribuição de probabilidade que dependerá da configuração, imposta ao gabarito ou assumida pela caverna a ser avaliada, bem como do grau de adestramento da equipe de medição.

Quaisquer que sejam a distribuição de probabilidade e a falta de circularidade aparente de uma configuração, existirá um escalar  $d^p$  tal que,  $P(|w - w^0| \leq d^p) = P$  (figura 4.13)!



- onde:
- $w_{ap}$  - é a falta de circularidade aparente;
  - $w_0$  - é a falta de circularidade verdadeira;
  - $d_p$  - é um escalar conveniente;
  - $p$  - é uma probabilidade;

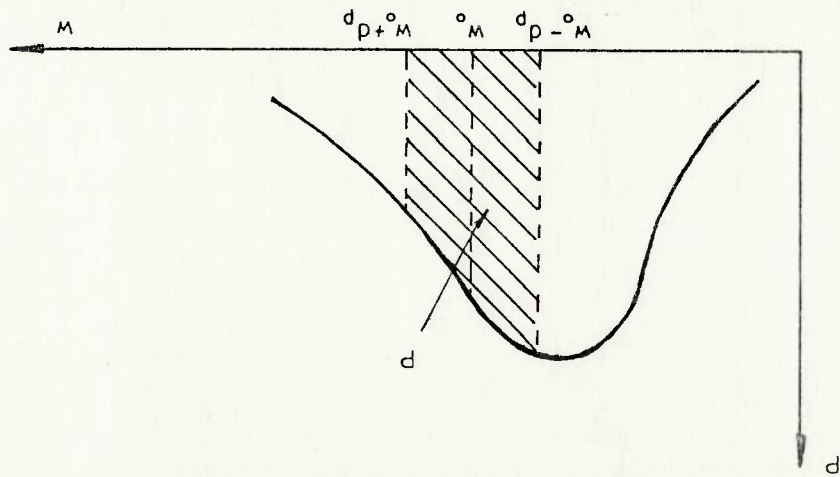


Figura 4.1 - Distribuição das faltas de circularidades aparentes

O conhecimento de um, ou de vários desses escalares  $d_p$ , chamados de amplitudes  $d_p$ , permite não só a qualificação do processo de medição que produz a distribuição de probabilidade, como a avaliação da influência dessa amplitude sobre o valor da falta de circularidade real em uma caverna, como será visto no capítulo VI.

A qualificação pode ser efetuada, através da comparação do valor de um erro que se julgue o máximo admissível, com o valor de diversas amplitudes  $d_p$ , permitindo assim, avaliar a probabilidade do processo de medição resultar em erros acima do aceitável, pois a cada amplitude  $d_p$  é associada uma probabilidade  $p$ .

A estimação das amplitudes descritas será feita através de intervalos de confiança, do tipo  $[0, \hat{d}_p]$ , em que  $\hat{d}_p$  é uma estatística amostral cujo método de cálculo é descrito detalhadamente na referência [16]. A estimativa de que  $d_p$  está em  $[0, \hat{d}_p]$ , naturalmente, estará sujeita a chances de erro e acerto, sendo esta última, a partir de agora, referida sempre como credibilidade do intervalo  $[0, \hat{d}_p]$ , isto é, a probabilidade de que a amplitude esteja dentro deste intervalo.



Resta saber como, após definir uma probabilidade  $P$ , que interesse, pode-se calcular um  $\hat{d}_p$ , tal que  $[0, \hat{d}_p]$  tenha uma credibilidade  $C$  tão alta quanto se deseja. Isto dará condições para que a partir de uma amostra de falta de circularidade aparentes  $[w_1^{app}, w_2^{app}, \dots, w_{n^{app}}]$  se possa obter afirmações do tipo:

- com  $C$  de credibilidade, tem-se no mínimo  $P$  de probabilidade do valor da falta de circularidade aparente pertencer ao intervalo  $[w_0 - \hat{d}_p, w_0 + \hat{d}_p]$ .  
 As proposições que justificam o método de cálculo de  $\hat{d}_p$ , como já foi dito, estão detalhadas na referência [16]. Porém, resumindo o que lá está descrito, pode-se dizer que o procedimento consiste em dispensar  $(1-1)$  observações mais distantes da falta de circularidade verdadeira  $w_0$ , e escolher entre as remanescentes a mais distante. Este procedimento pode ser usado para estimar qualquer  $\hat{d}_p$ , ainda que isso implique em credibilidades diferentes, a depender da amplitude que esteja sendo estimada.

Pode-se demonstrar que, se forem dispensados  $(1-1)$ , de  $n$  observações, a credibilidade da estimativa diminui, à medida que  $P$  aumenta, dentro de um intervalo  $[\frac{1}{2}, 1]$ .

De maneira análoga, é possível mostrar que a derivada da credibilidade, em relação ao número de observações da amostra, é positivo, para um mesmo número de observações extremas dispensadas, assim como é negativa a derivada da credibilidade em relação ao número de observações extremas dispensadas, fixando o tamanho da amostra.

As últimas considerações tornam bastante natural que, dispondo de uma amostra de tamanho  $n$ , para realizar as estimativas, se procure encontrar o número máximo de observações extremas que podem ser dispensadas, sem que isso baixe excessivamente a credibilidade do intervalo  $[0, \hat{d}_p]$ . Encontrando-se esse número estar-se-á, na verdade, minimizando o comprimento do intervalo  $[0, \hat{d}_p]$ , dentro de uma restrição de credibilidade, uma vez que, por exemplo, a quarta observação mais distante de  $w_0$  estará, obviamente, mais próximo do valor de  $w_0$  que a terceira, segunda e primeira observações

mais distantes. De maneira a efetuar essa maximização do número de amostras dispensáveis, BUELTA e FREITAS [16], criaram o seguinte algoritmo:

- Passo 1 - Fixar uma credibilidade mínima C e uma probabilidade mínima P;
- Passo 2 - Ir calculando, para k, tomado a partir de 1, os termos da série:

$$S(k) = \sum_{j=1}^k \binom{n-j+1}{n} p^{n-j+1} (1-p)^{j-1} \quad \text{(IV.1)}$$

até que S(k) seja maior que 1 - (credibilidade C). Quando isto ocorrer, tomar o índice do penúltimo termo calculado, isto é, tomar j = (k-1)

Note-se que sendo a amostra pequena, pode ocorrer de, mesmo não dispensando nenhuma observação (j=1), não se obten a credibilidade desejável, ou seja, S(1) > 1-C.

Nestas condições, ou refaz-se o cálculo com um novo tamanho de amostra, ou aceita-se uma credibilidade menor.

Passo 3 - Fazer  $\hat{d}^p = 1$ -ésima maior distância, entre  $w_0$  e as observações da amostra. Portanto, obtêm-se o intervalo  $[w_0 - \hat{d}^p, w_0 + \hat{d}^p]$ , para a credibilidade mínima C e a probabilidade P desejados.

O modo como o algoritmo busca o l máximo é, simplismente, calculando-se (1-C), para os diversos l possíveis. Quando encontra o primeiro candidato a l, que fornece credibilidade abaixo de C, escolhe-se o penúltimo índice tentado.

Este algoritmo, foi automatizado, com o programa Amplit [14], que determina para uma amostra de n observações, com base em uma credibilidade C e probabilidade P fornecidas, as k observações a serem desconsideradas. Fornecendo-se o valor de  $w_0$  obtêm-se o valor de  $\hat{d}^p$ .

No caso da qualificação dos processos descritos no capítulo III, determinou-se, após repetidos processamentos com valores de n, crescentes, que uma amostra de 64 observações não teria





Os testes que serão dimensionados para a seleção de operadores, pertencem todos a uma classe (T) de testes estatísticos, que consistem na medição pelo operador de uma mesma configuração de gabarito,  $m$  vezes, e na avaliação desse operador que efetua as medições como qualificado, se e somente se, ele obtiver um número de faltas de circularidade aparentes, fora de um intervalo  $(w_0 + d)$ , pré-definido, menor ou igual a um parâmetro  $n$ , característico do teste. Esses testes são especificados por um vetor  $(p_1, p_2, d, P)$ , onde:

- $p_1$  - é a probabilidade de acerto, que se julga mínima necessária para que um operador seja considerado apto;
- $p_2$  - é a probabilidade de acerto, abaixo da qual se considera um operador gravemente inábil;
- $d$  - é a distância entre as faltas de circularidade verdadeira e aparente;
- $P$  - é a probabilidade que se considera mínima aceitável tanto para a aprovação de candidatos aptos, quanto para a reprovação dos inábeis;

Sendo que este vetor descreve a habilidade julgada necessária aos operadores, e o risco admissível, de que eles não a possuam.

Este risco, naturalmente, consiste na chance de operadores com destreza "muito abaixo" da necessária serem aprovados na seleção. A tarefa de identificar, entre os testes de (T), aquele de menor tamanho amostral, e que atende a uma especificação  $(p_1, p_2, d, P)$ , será efetuada, de maneira satisfatória, através de um algoritmo desenvolvido por BUELTA e FREITAS [15].

Este algoritmo consiste em examinar os diversos testes que podem ser efetuados, com um determinado tamanho amostral, até encontrar um que implique uma probabilidade de aprovação maior ou igual a  $P$ , para operadores que tenham uma chance  $p_1$  de acerto.



Encontrado esse teste, para um determinado tamanho de amostra, o algoritmo verifica, para esse mesmo teste, a chance de aprovação de um operador que acerte a medição, com chance  $p_2$ . Sendo essa chance, menor ou igual a  $(1-p)$ , o algoritmo adota o teste em exame, como adequado para a seleção de operadores. Caso contrário, ele reinicia a avaliação dos testes, com um tamanho amostral maior.

BUELTA e FREITAS [15], comprovaram a certeza de que, esse algoritmo se completa com um número finito de passos, isto é, que ele sempre identifica um tamanho amostral com que se pode realizar um teste (T), atendendo qualquer vetor  $(p_1, p_2, d, P)$ , pré-estabelecido.

As proposições que se baseia o cálculo da probabilidade de aprovação dos operadores com chances de acerto  $p_1$  e  $p_2$ , em cada um dos testes examinados, estão explicitadas na referência [15], porém será efetuado aqui uma explanação do funcionamento deste algoritmo.

Passo 0 - Inicializar  $m$ , com o valor 1;

Passo 1 - Utilizando, sempre, o mesmo valor de  $m$ , calcular  $PLA/p, m, n]$ , para um operador com chance  $p_1$  de acerto, usando todos os valores de  $n$ , a partir de zero, até que para um determinado valor de  $n$ ,  $PLA/p, m, n] \geq p$ ;

Passo 2 - Encontrado um teste, com parâmetros  $m$  e  $n$ , que implique numa chance de aprovação desejável, quando a chance de acerto do operador for  $p_1$ , verificar para esse mesmo teste, a chance de aprovação de um operador que tenha chance de acerto  $p_2$ ;

Passo 3 - Se for verificado, que a chance de aprovação nesse último caso, é menor ou igual a  $(1-p)$ , adotar  $m, n$ , como parâmetros do teste de qualificação. Do contrário incrementar  $m$ , de uma unidade, e voltar ao passo 1.

Sendo os parâmetros  $m$  e  $n$ , apontados pelo algoritmo, os menores valores, que tornam as chances de aprovação de operadores aptos, e reprovação de operadores inábeis, de acordo com a especificação  $(p_1, p_2, d, P)$ , é evidente que o teste apontado pelo algoritmo é o menor tamanho amostral; com essas características.

Simplificando, com um exemplo prático, pode-se basear em estudos já realizados por BUELTA e FREITAS [16], para o método da régua em arco, que indicam que equipes razoavelmente adestradas, numa vizinhança de 1 mm, em torno de  $w_0$ , e que, nestas condições, é possível efetuar-se controle de qualidade das cavernas de submersíveis, com precisão e custo bastante satisfatórios.

Em vista disso, duas componentes do vetor  $\vec{E}$ , ( $p_1$ ,  $p_2$ ,  $d$ ,  $P$ ), já podem ser determinadas, a saber,  $d=1\text{mm}$  e  $p_1=93\%$ .

A determinação de  $p_2$  e  $P$  será, agora, executada da maneira iterativa, já descrita anteriormente, através do programa computacional AmpIt, que fornece para uma entrada ( $p_1$ ,  $p_2$ ), e diversos tamanhos amostrais, as chances de reprovção, para todos os testes de (T), com um determinado tamanho amostral.

Tomando-se agora como  $\vec{E}$  inicial, ( $p_1=93\%$ ,  $p_2=70\%$ ,  $d=1\text{mm}$ ,  $P=90\%$ , as sucessivas iterações indicarão que  $m=20$  é o maior tamanho amostral, com que se pode construir um teste obedecendo a especificação fornecida. Essas iterações são mostradas no anexo 1.

Admitindo-se que  $m=20$ , é um tamanho amostral pequeno, uma redefinição de  $\vec{E}$ , como um novo vetor ( $p_1=93\%$ ,  $p_2=80\%$ ,  $d=1\text{mm}$ ,  $P=90\%$ , já exige, segundo as iterações obtidas, (ver anexo 2), um tamanho amostral maior que  $m=26$ .

Isto torna razoável uma opção pelo teste da especificação inicial, cujos parâmetros foram apontados por BUELTA e FREITAS como sendo  $m=20$  e  $n=2$ , visto que uma elevação significativa de  $p_2$ , aumentando-se o rigor do teste, não compensaria os custos adicionais que se incorreria ao aplicá-lo.

Portanto, para qualificar um operador, com os parâmetros acima descritos, irá utilizar-se uma amostra de 20 medições, sendo até 2 dispensáveis, ou seja 2 erros.

## IV.3 - PROCEDIMENTOS UTILIZADOS DURANTE A QUALIFICAÇÃO

Partindo dos tamanhos de amostra, definidos nos itens IV.2.1 e IV.2.2, ou seja 64 medições para a qualificação do processo de medição e 20 medições para a qualificação do operador, buscou-se qualificar cada um dos processos individualmente utilizando-se os procedimentos que são descritos a seguir.

## IV.3.1 - COMPASSO

Através da movimentação dos parafusos de ajuste da chapa simuladora do casco, do gabarito NUCLEP, o qual se encontrava na posição horizontal, conforme pode ser visto no esquema da figura 4.2, procurou-se impor à chapa simuladora do casco, inicialmente a configuração:

$$C_1 = 4 \cos 4\theta + 2 \sin 3\theta + 3 \cos \theta + 5 \sin \theta \quad (\text{mm}),$$

onde, para cada valor de  $\theta$ , que corresponde ao ângulo de cada um dos parafusos do gabarito, obtive-se um determinado valor de  $C_1$  em mm, que é a distância entre a chapa simuladora e o círculo de referência naquele ponto.

Esta é bastante complexa, pois, verifica-se que configurações de várias ondas, como a apresentada, dificilmente acontecem na prática. Devido ao processos de fabricação de configurações de ordem 2 e 3, são extremamente preponderantes. Com isto, essa configuração de um grau elevado de complexidade, maximizará os erros do instrumento de medição.

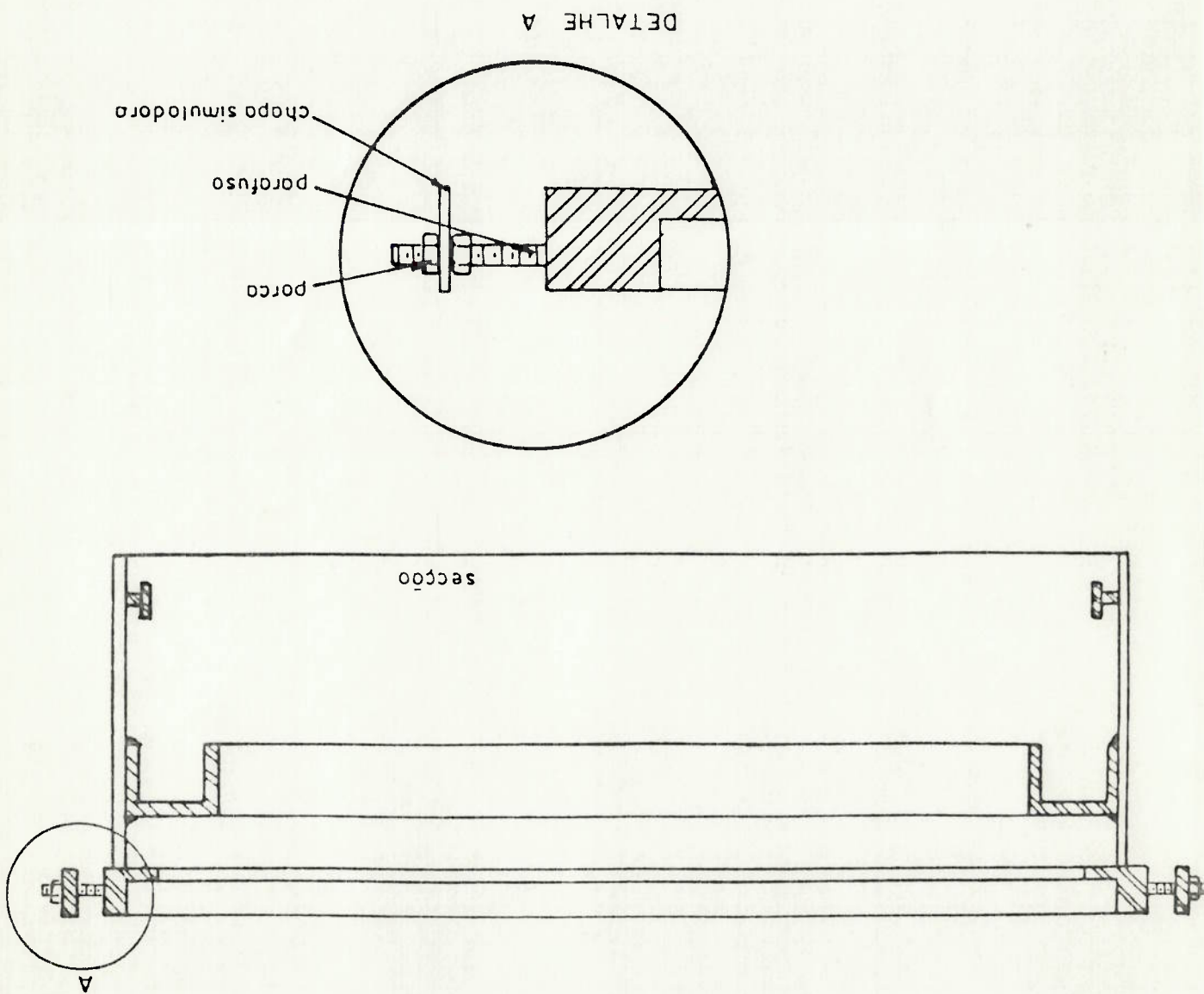
A seguir, uma outra configuração complexa foi imposta ao gabarito visando o mesmo intento:

$$C_2 = 4 \cos 5\theta + 2 \sin 4\theta + 3 \cos \theta + 5 \sin \theta \quad (\text{mm}),$$

O processamento dessas configurações teóricas, determinaram a máxima falta de circularidade de cada configuração;

$$w_1 = 5,45 \text{ mm} \quad e \quad w_2 = 5,71 \text{ mm},$$

Figura 4.2 - Esquema do gabarito NUCLEP na posição horizontal





porém o processo de imposição da falta de circularidade envolve erros, devido principalmente, ao ajuste manual dos parafusos, além do erro da precisão e de leitura do paquímetro utilizado para a imposição e verificação da configuração imposta. Uma representação esquemática desse paquímetro pode ser vista na

Figura 4.3.

Para a análise desses erros, tomaram-se os off-sets das estações de 5 em 5<sup>o</sup> utilizando-se para tanto o paquímetro acima descrito, para a primeira e a segunda configurações, conforme mostram as tabelas IV.2 e IV.3, respectivamente.

Dispondo desses dados, obteve-se a falta de circularidade verdadeira das configurações impostas, através do processamento do programa CIRSUBDO, as respectivas decomposições em série de senos e cossenos, utilizando o programa desenvolvido por BUELTA e CALIXTO [17], ESCOAMEN, e utilizando um outro programa computacional desenvolvido também por BUELTA e CALIXTO [18], o DRAWKL, obteve-se o aspecto gráfico da forma do contorno imposto à chapa simuladora do casco.

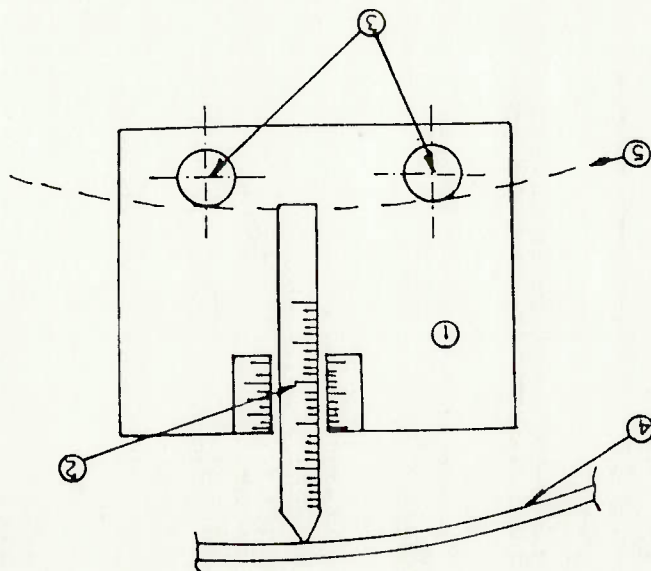
Nas tabelas A.1 e A.2, do apêndice A, resumem-se os resultados obtidos pelo processamento do programa CIRSUBDO. Nas tabelas A.3 e A.4 desse mesmo apêndice, são mostrados os resultados das séries de senos e cossenos e nas figuras 4.4 e 4.5 têm-se o contorno de cada uma das configurações.

Pode-se verificar pelos resultados obtidos que, os desvios verificados, em relação aos valores teóricos, são pequenos, de modo que não comete-se grandes erros em admitir que as configurações verdadeiras são muito próximas das teóricas, previamente estabelecidas, em nada obstaculizando o procedimento de qualificação.

Figura 4.3 - Representação esquemática do paquímetro utilizado para leitura e imposição de configurações no gabarito NUCLEP

- ① bloco de alumínio
- ② paquímetro adaptado ( $\pm 0.05\text{mm}$ )
- ③ pino guia
- ④ chapa simuladora de casco
- ⑤ círculo perfeito de gabarito NUCLEP

VISTA EMP LANTA



VISTA LATERAL

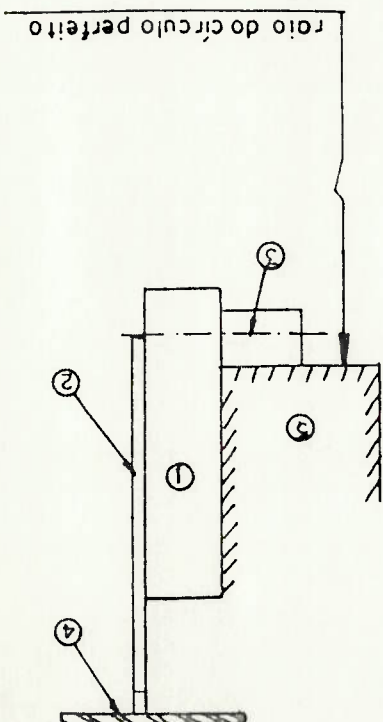


Tabela IV.2 - Valores obtidos com a leitura de 5 em 5° da chapa estimuladora do casco quando imposta a configuração C<sub>1</sub>.

PTO	MEDIDA	PTO	MEDIDA
0	6.98	36	0.98
1	7.78	37	0.88
2	8.43	38	-0.52
3	7.63	39	-3.62
4	5.83	40	-6.92
5	6.08	41	-8.32
6	5.08	42	-9.07
7	3.91	43	-9.07
8	2.93	44	-9.62
9	3.08	45	-11.07
10	2.03	46	-7.97
11	2.51	47	-7.02
12	3.83	48	-7.87
13	5.38	49	-4.52
14	5.88	50	-3.37
15	6.18	51	-2.17
16	6.43	52	-1.87
17	6.48	53	0.43
18	6.98	54	0.98
19	6.08	55	-0.57
20	5.53	56	0.03
21	4.63	57	-0.62
22	3.48	58	-3.57
23	2.23	59	-4.27
24	0.78	60	-4.87
25	-0.02	61	-6.17
26	0.13	62	-7.47
27	-1.17	63	-6.82
28	-0.77	64	-7.52
29	-1.17	65	-6.92
30	-0.12	66	-3.92
31	0.88	67	-1.07
32	1.53	68	0.58
33	1.78	69	2.18
34	1.18	70	3.08
35	0.33	71	5.18

Obs: medidas em mm

Tabela IV.3 - Valores obtidos com a leitura de 5 em 5° da chapa estimuladora do casco quando imposta a configuração  $C_2$ .

PTO	MEDIA	PTO	MEDIA
0	6.98	36	-7.02
1	7.41	37	-6.57
2	7.73	38	-4.57
3	6.93	39	-3.47
4	5.43	40	-3.17
5	5.23	41	-0.97
6	3.33	42	0.08
7	2.23	43	-0.37
8	1.93	44	-1.37
9	2.78	45	-2.87
10	2.98	46	-1.92
11	4.48	47	-5.17
12	6.08	48	-9.62
13	7.98	49	-11.17
14	8.38	50	-10.72
15	7.73	51	-11.17
16	6.63	52	-10.47
17	5.43	53	-7.02
18	4.98	54	-5.02
19	3.33	55	-3.77
20	2.43	56	0.08
21	1.93	57	1.53
22	2.13	58	-0.02
23	2.53	59	0.78
24	2.58	60	0.93
25	3.33	61	-0.87
26	5.08	62	-3.42
27	4.23	63	-4.27
28	3.73	64	-6.32
29	2.08	65	-6.87
30	1.58	66	-5.07
31	0.08	67	-2.92
32	-2.67	68	-1.27
33	-4.42	69	0.93
34	-4.87	70	2.93
35	-6.37	71	5.23

Obs: medidas em mm



Figura 4.4 - Representação gráfica da configuração imposta  $C_1$

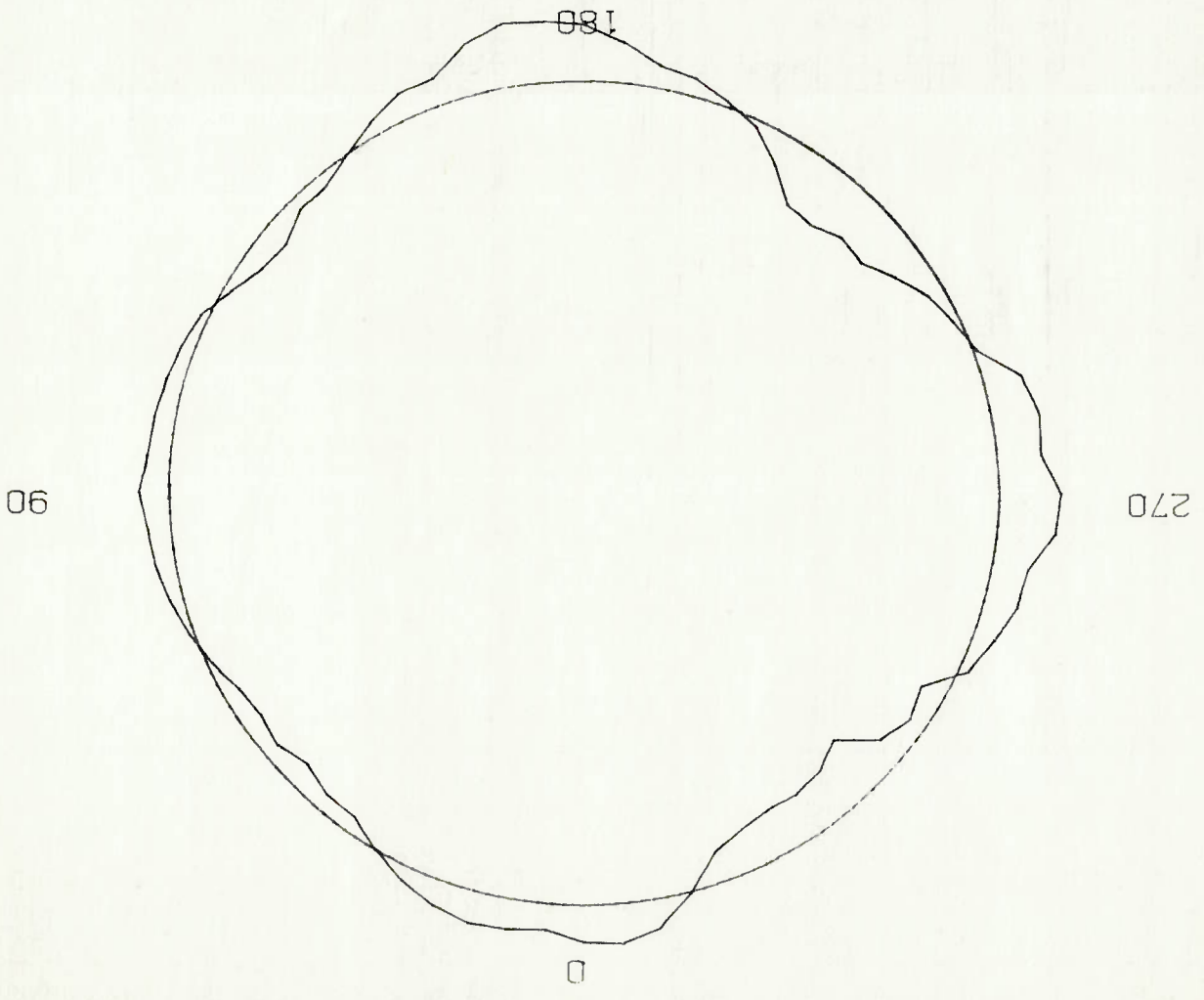
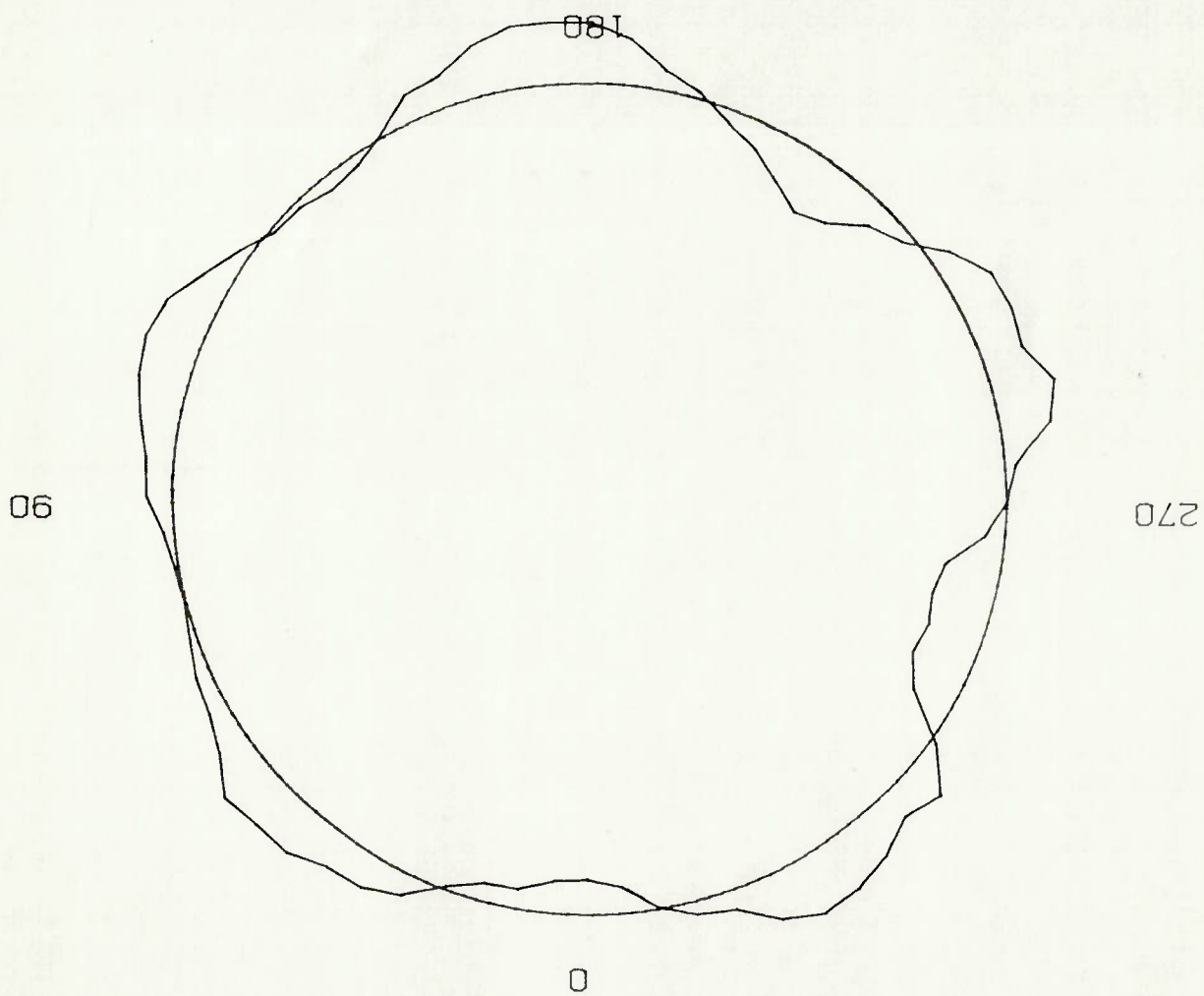


Figura 4.5 - Representação gráfica da configuração imposta  $C_2$



De posse desses valores, partiu-se para obter o que convencionou-se chamar de falta de circularidade aparente. De modo a assegurar-se a eficiência do tratamento estatístico, tomou-se algumas precauções, no sentido de se evitar o surgimento de amostragens "viciadas":

- Os operadores não podiam ter conhecimento dos valores verdadeiros de falta de circularidade, nem tão pouco dos valores teóricos;

- Os operadores se alternaram na manipulação do compasso, para cada uma das configurações impostas;

- Alternava-se esporadicamente e aleatoriamente o comprimento da haste do compasso, de modo a obter-se traçados com diferentes círculos ótimos;

- A identificação do traçado/configuração/operador do compasso foi ocultada. Os traçados obtidos a seguir, foram submetidos ao ajuste dos gabaritos circulares, cabendo, a cada um dos tres operadores participantes da qualificação, a terça parte da amostragem total de 64 medições.

Nas tabelas IV.4 e IV.5 são apresentadas as faltas de circularidade aparentes, obtidas após esse ajuste dos gabaritos circulares, referentes a cada uma das 64 medições, realizadas para cada uma das configurações,  $C_1$  e  $C_2$ , que serão comparadas com a falta de circularidade verdadeira, conforme pode ser visto no capítulo V.1.

Tabela IV.4 - Resultados obtidos de falta de circularidade aparente para as 64 medições da configuração C<sub>1</sub>

MEDIÇÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE	MEDIÇÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE
01	6,20	33	6,50
02	6,40	34	6,50
03	6,40	35	6,50
04	6,10	36	6,30
05	6,50	37	6,50
06	6,50	38	6,50
07	6,70	39	6,50
08	6,30	40	6,50
09	6,30	41	6,40
10	6,30	42	6,60
11	6,30	43	6,50
12	6,60	44	6,50
13	6,70	45	6,50
14	6,70	46	6,50
15	6,50	47	6,50
16	6,40	48	6,50
17	6,30	49	6,50
18	6,40	50	6,50
19	6,60	51	6,50
20	6,30	52	6,50
21	6,50	53	6,50
22	6,50	54	6,50
23	6,50	55	6,50
24	6,50	56	6,50
25	6,50	57	6,50
26	6,50	58	6,50
27	6,50	59	6,50
28	6,40	60	6,50
29	6,50	61	6,80
30	6,50	62	6,50
31	6,50	63	6,30
32	6,50	64	6,50

Obs: medidas em mm



Tabela IV.5 - Resultados obtidos de falta de circularidade aparente para as 64 medições da configuração C<sup>2</sup>

MEDICÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE	MEDICÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE
01	6,10	33	6,10
02	6,50	34	6,10
03	6,00	35	6,00
04	6,20	36	6,00
05	6,30	37	6,30
06	6,30	38	6,00
07	6,10	39	6,10
08	6,10	40	6,00
09	6,10	41	6,20
10	6,50	42	6,40
11	6,40	43	6,20
12	6,30	44	6,00
13	6,30	45	6,00
14	6,40	46	6,30
15	6,50	47	6,00
16	6,10	48	6,10
17	6,40	49	6,10
18	6,40	50	6,10
19	6,10	51	6,60
20	6,40	52	6,20
21	6,10	53	6,10
22	6,00	54	6,00
23	6,30	55	6,50
24	6,50	56	6,70
25	6,30	57	6,00
26	6,00	58	6,10
27	6,00	59	6,40
28	6,30	60	6,30
29	6,30	61	6,50
30	6,20	62	6,10
31	6,40	63	6,20
32	6,20	64	6,00

Obs: medidas em mm

Analogamente ao processo de qualificação do compasso, foram introduzidas no gabarito, que agora se encontrava na posição vertical conforme mostra a figura 4.6, para simular com maior realidade o casco de um submarino em construção, as configurações:

$$C_1 = 4 \cos 4\theta + 2 \sin 3\theta + 3 \cos \theta + 5 \sin \theta \text{ (mm)},$$

$$C_2 = 4 \cos 5\theta + 2 \sin 4\theta + 3 \cos \theta + 5 \sin \theta \text{ (mm)}.$$

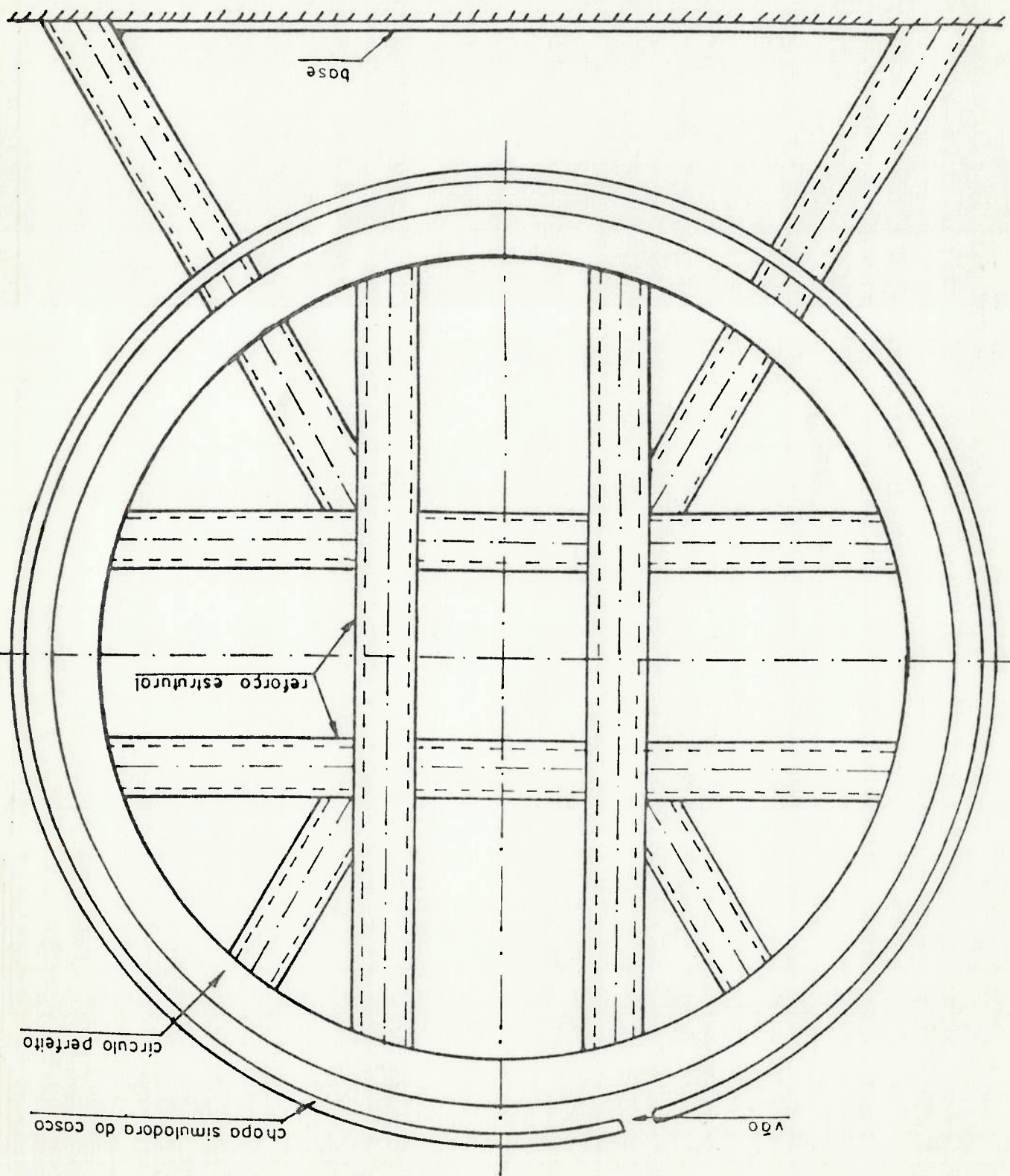
O processo de medição dos off-sets verdadeiros dessas configurações, foi o mesmo utilizado no processo de qualificação do compasso, ou seja, utilizou-se o paquímetro da figura 4.3, medindo-se estas estações de 5 em 5°.

O processo de jig, como é um processo de medição de falta de circularidade externa necessita dos dados de espessura da chapa, para que se conheça o verdadeiro off-set em cada uma das estações, já que estes foram impostos pelo lado interno do gabarito.

Como será descrito no capítulo IV.4.2, durante as impositões das configurações, foram constatadas deflexões da superfície de referência que podem introduzir erros na avaliação da falta de circularidade verdadeira. Conseqüentemente, mediram-se os raios dessa superfície de referência. As medições desses raios foram executadas nas estações em que iriam ser medidos os off-sets, tendo sido realizadas duas medições de cada raio.

De posse das medições do raio do círculo de referência, processou-se o programa CIRSUBDO, obtendo-se o raio do círculo perfeito do gabarito, tal como os desvios radiais do círculo de referência em relação ao círculo perfeito, como podem ser vistos nas tabelas B.1 e B.2 do apêndice B.

Figura 4.6 - Esquema do gabarito NUCLEP na posição vertical





A composição dos desvios radiais do círculo de referência, com as espessuras da chapa estimuladora do casco e com os off-sets impostos internamente à configuração, resultou nas configurações verdadeiramente impostas ao gabarito, cujos valores de desvios radiais, das espessuras e dos off-sets impostos podem ser vistos nas tabelas IV.6.a e b, para a primeira configuração, e nas tabelas IV.7.a e b, para a segunda configuração.

Nas tabelas B.3, B.4, B.5 e B.6 do apêndice B são mostrados os resultados dos processamentos dos programas CIRSUBDO e ESCOAMEN, respectivamente, para a primeira e a segunda medições de raio da configuração  $C_1$ , que são os dados das tabelas IV.6.a e b, respectivamente. O mesmo acontece para os dados das tabelas IV.7.a e b, referentes à configuração  $C_2$ , cujos resultados dos processamentos estão mostrados nas tabelas B.7, B.8, B.9, B.10 do apêndice B. As figuras 4.7 a e b, e 4.8 a e b mostram a representação gráfica das configurações  $C_1$  e  $C_2$ , respectivamente, para a primeira e segunda medições do raio.

Os valores de falta de circularidade aparente, foram obtidos a partir das 64 medições executadas para cada uma das configurações, utilizando-se o processo descrito no item III.3.2, sendo que, a cada conjunto de oito medições, o operador a ser qualificado ajustava novamente o cinzel, e com este último, ajustava as placas móveis.

Nas tabelas IV.8 e IV.9, são apresentados os valores das faltas de circularidade aparentes, referente as 64 medições executadas para cada uma das configurações impostas,  $C_1$  e  $C_2$ , e que serão posteriormente comparados com o valor de falta de circularidade verdadeira.



Tabela IV.6.a- Resultados da totalização dos valores de espessura, da primeira medição de raios, e da medição dos oft-sets para a configuração C<sup>1</sup>.

Pto	med. raios	esp. chapa	oft- set	Total	Pto	med. raios	esp. chapa	oft- set	Total
0	-0.04	6.5	50.85	57.31	36	-0.11	6.5	44.85	51.24
1	0.03	6.5	51.80	58.33	37	-0.10	6.5	44.40	50.80
2	0.00	6.5	52.05	58.55	38	-0.11	6.5	42.70	49.09
3	0.01	6.6	51.50	58.11	39	-0.09	6.5	40.25	46.66
4	0.04	6.5	50.40	56.94	40	-0.08	6.5	37.75	44.17
5	0.04	6.4	50.10	56.54	41	-0.06	6.4	36.10	42.44
6	0.06	6.4	48.95	55.41	42	-0.02	6.4	34.75	31.13
7	0.06	6.4	48.30	54.76	43	0.00	6.5	35.15	41.65
8	0.03	6.5	47.55	54.08	44	0.00	6.4	35.00	41.40
9	0.05	6.5	46.95	53.50	45	0.03	6.4	32.80	39.23
10	0.07	6.5	45.95	52.52	46	0.06	6.4	35.15	41.61
11	0.08	6.4	46.55	53.03	47	0.08	6.4	36.00	42.48
12	0.09	6.4	47.70	54.19	48	0.11	6.4	36.05	42.56
13	0.10	6.5	49.15	55.75	49	0.11	6.4	38.85	45.36
14	0.11	6.4	49.20	55.71	50	0.10	6.4	41.80	48.30
15	0.06	6.5	50.05	56.61	51	0.08	6.4	41.70	48.18
16	0.04	6.5	50.90	57.44	52	0.08	6.4	42.50	48.98
17	0.03	6.4	50.80	57.23	53	0.06	6.4	44.30	50.76
18	0.01	6.5	50.85	57.36	54	0.07	6.4	44.85	51.32
19	0.03	6.4	49.95	56.38	55	0.04	6.5	46.40	52.94
20	0.01	6.4	49.60	56.01	56	0.03	6.4	46.10	52.53
21	0.02	6.4	48.50	54.92	57	0.02	6.4	43.25	49.67
22	0.09	6.4	47.20	53.69	58	0.04	6.5	43.50	50.04
23	0.08	6.4	45.30	51.78	59	0.04	6.4	42.50	48.94
24	0.09	6.5	44.70	51.29	60	0.03	6.5	39.05	45.58
25	0.10	6.4	45.00	51.50	61	0.04	6.3	40.50	47.24
26	0.05	6.4	45.10	51.55	62	-0.01	6.4	39.50	45.79
27	0.05	6.3	42.70	49.05	63	0.00	6.3	37.05	43.35
28	0.03	6.5	42.50	49.03	64	-0.01	6.4	37.00	43.39
29	0.01	6.4	42.35	48.76	65	-0.04	6.4	40.90	47.26
30	-0.01	6.5	43.75	50.24	66	-0.05	6.6	39.95	46.50
31	-0.04	6.6	45.00	51.56	67	-0.08	6.5	45.30	51.72
32	-0.06	6.5	45.45	51.89	68	-0.11	6.5	49.85	56.24
33	-0.11	6.4	45.70	51.99	69	-0.11	6.6	46.05	52.54
34	-0.11	6.4	46.60	52.89	70	-0.09	6.5	47.90	54.31
35	-0.10	6.5	46.60	53.00	71	-0.07	6.4	49.55	55.88

Obs: medidas em mm

Tabela IV.6.b- Resultados da totalização dos valores de espessura, da segunda medição de raios, e da medição dos off-sets para a configuração C<sup>1</sup>.

Pto	med. rano	esp. chapa	off-set	Total
0	-0.11	6.5	50.85	57.24
1	-0.09	6.5	51.80	58.21
2	-0.04	6.5	52.05	58.51
3	-0.03	6.6	51.50	58.07
4	0.00	6.5	50.40	56.90
5	0.02	6.4	50.10	56.52
6	0.03	6.4	48.95	55.38
7	0.03	6.4	48.30	54.73
8	0.05	6.5	47.55	54.10
9	0.06	6.5	46.95	53.51
10	0.10	6.5	45.95	52.55
11	0.10	6.4	46.55	53.05
12	0.10	6.4	47.70	54.20
13	0.11	6.5	49.15	55.75
14	0.10	6.4	49.20	55.70
15	0.09	6.5	50.05	56.74
16	0.07	6.5	50.90	57.47
17	0.06	6.4	50.80	57.26
18	0.05	6.5	50.85	57.40
19	0.05	6.4	49.95	56.40
20	0.06	6.4	49.60	56.06
21	0.06	6.4	48.50	54.96
22	0.08	6.4	47.20	53.68
23	0.10	6.4	45.30	51.80
24	0.10	6.5	44.70	51.30
25	0.10	6.4	45.00	51.50
26	0.07	6.4	45.10	51.57
27	0.05	6.3	42.70	49.05
28	0.04	6.5	42.50	49.04
29	0.01	6.4	42.35	48.76
30	-0.01	6.5	43.75	50.24
31	-0.04	6.6	45.00	51.56
32	-0.06	6.5	45.45	51.89
33	-0.08	6.4	45.70	52.02
34	-0.09	6.4	46.60	52.91
35	-0.10	6.5	46.60	53.00
36	-0.10	6.5	44.85	51.24
37	-0.11	6.5	44.40	50.79
38	-0.11	6.5	42.70	49.09
39	-0.11	6.5	40.25	46.64
40	-0.09	6.5	37.75	44.16
41	-0.08	6.4	36.10	44.42
42	-0.06	6.4	34.75	41.09
43	-0.04	6.5	35.15	41.61
44	-0.02	6.4	35.00	41.38
45	0.01	6.4	32.80	39.21
46	0.04	6.4	35.15	41.59
47	0.05	6.4	36.00	42.45
48	0.07	6.4	36.05	42.52
49	0.10	6.4	38.85	45.35
50	0.10	6.4	41.80	48.31
51	0.11	6.4	41.70	48.21
52	0.11	6.4	42.50	49.01
53	0.10	6.4	44.30	50.80
54	0.09	6.4	44.85	51.34
55	0.10	6.5	46.40	53.00
56	0.10	6.4	46.10	52.60
57	0.09	6.4	43.25	49.74
58	0.09	6.5	43.50	50.09
59	0.09	6.4	42.50	48.99
60	0.08	6.5	39.05	45.63
61	0.06	6.3	40.50	47.26
62	0.06	6.4	39.50	45.86
63	0.03	6.3	37.05	43.38
64	0.02	6.4	37.00	43.42
65	0.00	6.4	40.90	47.30
66	-0.04	6.6	39.95	46.51
67	-0.05	6.5	45.30	51.75
68	-0.08	6.5	49.85	56.27
69	-0.07	6.6	46.05	52.58
70	-0.07	6.5	47.90	54.33
71	-0.06	6.4	49.55	55.89

Obs: medtas em mm



Tabela IV.7.a- Resultados da totalização dos valores de espessura, da primeira medição de raios, e da medição dos off-sets para a configuração C<sup>2</sup>.

Pto	med. rano	esp. chapa	off-set	Total	Pto	med. rano	esp. chapa	off-set	Total
0	-0.04	6.5	50.80	57.31	36	-0.11	6.5	36.90	43.29
1	0.03	6.5	52.30	58.83	37	-0.10	6.5	39.70	46.10
2	0.00	6.5	52.25	58.70	38	-0.11	6.5	41.95	48.34
3	0.01	6.6	50.90	57.51	39	-0.09	6.5	40.35	46.76
4	0.04	6.5	49.30	55.84	40	-0.08	6.5	38.30	44.72
5	0.04	6.4	48.70	55.14	41	-0.06	6.4	40.85	47.19
6	0.06	6.4	47.20	53.66	42	-0.02	6.4	44.00	50.38
7	0.06	6.4	46.90	53.36	43	0.00	6.5	44.50	51.00
8	0.03	6.5	46.75	53.28	44	0.00	6.4	43.50	49.90
9	0.05	6.5	46.70	53.25	45	0.03	6.4	41.05	47.48
10	0.07	6.5	46.30	52.87	46	0.06	6.4	40.40	50.86
11	0.08	6.4	48.05	54.53	47	0.08	6.4	36.75	43.23
12	0.09	6.4	49.90	56.39	48	0.11	6.4	34.30	40.81
13	0.10	6.5	51.35	57.95	49	0.11	6.4	38.45	42.66
14	0.11	6.4	51.10	57.61	50	0.10	6.4	35.25	41.75
15	0.06	6.5	51.65	58.21	51	0.08	6.4	32.70	39.15
16	0.04	6.5	51.45	57.99	52	0.08	6.4	39.05	43.53
17	0.03	6.4	49.85	56.28	53	0.06	6.4	40.00	46.46
18	0.01	6.5	48.85	55.36	54	0.07	6.4	38.85	45.32
19	0.03	6.4	47.60	54.03	55	0.04	6.5	42.00	48.54
20	0.01	6.4	46.65	53.06	56	0.03	6.4	46.50	52.63
21	0.02	6.4	45.75	52.17	57	0.02	6.4	45.45	51.87
22	0.09	6.4	46.45	52.94	58	0.04	6.5	45.25	51.79
23	0.08	6.4	46.45	52.93	59	0.04	6.4	45.90	50.34
24	0.09	6.5	46.35	52.94	60	0.03	6.5	44.75	51.28
25	0.10	6.4	47.30	53.80	61	0.04	6.3	44.90	51.24
26	0.05	6.4	48.85	55.30	62	-0.01	6.4	42.40	48.79
27	0.05	6.3	48.10	54.45	63	0.00	6.3	39.65	45.95
28	0.03	6.5	48.10	54.63	64	-0.01	6.4	38.55	44.94
29	0.01	6.4	45.95	52.36	65	-0.04	6.4	37.60	43.06
30	-0.01	6.5	45.50	51.99	66	-0.05	6.6	38.75	45.30
31	-0.04	6.6	45.75	52.31	67	-0.08	6.5	44.45	50.87
32	-0.06	6.5	42.80	49.24	68	-0.11	6.5	47.00	53.39
33	-0.11	6.4	39.45	45.74	69	-0.11	6.6	44.75	51.24
34	-0.11	6.4	39.95	46.24	70	-0.09	6.5	46.90	53.31
35	-0.10	6.5	39.25	45.65	71	-0.07	6.4	48.95	55.28

Obs: medidas em mm

Tabela IV.7.b- Resultados da totalização dos valores de espessura, da segunda medição de raios, e da medição dos off-sets para a configuração C<sub>2</sub>.

Pto	med. raios	esp. chapa	off-set	Total	Pto	med. raios	esp. chapa	off-set	Total
0	-0.11	6.5	50.80	57.19	36	-0.10	6.5	36.90	43.30
1	-0.09	6.5	52.30	58.71	37	-0.11	6.5	39.70	46.09
2	-0.04	6.5	52.25	58.66	38	-0.11	6.5	41.95	48.34
3	-0.03	6.6	50.90	57.47	39	-0.11	6.5	40.35	46.74
4	0.00	6.5	49.30	55.80	40	-0.09	6.5	38.30	44.71
5	0.02	6.4	48.70	55.12	41	-0.08	6.4	40.85	47.17
6	0.00	6.4	47.20	53.63	42	-0.06	6.4	44.00	50.34
7	0.03	6.4	46.90	53.33	43	-0.04	6.5	44.50	50.96
8	0.05	6.5	46.75	53.30	44	-0.02	6.4	43.50	49.88
9	0.06	6.5	46.70	53.26	45	0.01	6.4	41.05	47.46
10	0.10	6.5	46.30	52.90	46	0.04	6.4	40.40	46.84
11	0.10	6.4	48.05	54.55	47	0.05	6.4	36.75	43.20
12	0.10	6.4	49.90	56.40	48	0.07	6.4	34.30	40.77
13	0.11	6.5	51.35	57.96	49	0.10	6.4	38.45	42.65
14	0.10	6.4	51.10	57.60	50	0.11	6.4	35.25	41.76
15	0.09	6.5	51.65	58.24	51	0.11	6.4	32.70	39.21
16	0.07	6.5	51.45	58.07	52	0.11	6.4	39.05	43.56
17	0.06	6.4	49.85	56.31	53	0.10	6.4	40.00	47.10
18	0.05	6.5	48.85	55.40	54	0.09	6.4	38.85	45.34
19	0.05	6.4	47.60	54.05	55	0.10	6.5	42.00	48.60
20	0.06	6.4	46.65	53.11	56	0.10	6.4	46.50	52.70
21	0.06	6.4	45.75	52.21	57	0.09	6.4	45.45	51.94
22	0.08	6.4	46.45	52.93	58	0.09	6.5	45.25	51.94
23	0.10	6.4	46.45	52.95	59	0.09	6.4	45.90	52.39
24	0.10	6.5	46.35	52.95	60	0.08	6.5	44.75	51.33
25	0.10	6.4	47.30	53.80	61	0.06	6.3	44.90	51.26
26	0.07	6.4	48.85	55.32	62	0.06	6.4	42.40	48.86
27	0.05	6.3	48.10	54.45	63	0.03	6.3	39.65	45.98
28	0.04	6.5	48.10	54.64	64	0.02	6.4	38.55	44.97
29	-0.01	6.4	45.95	52.34	65	0.00	6.4	37.60	44.00
30	-0.01	6.5	45.50	51.99	66	-0.04	6.6	38.75	45.31
31	-0.04	6.6	45.75	52.31	67	-0.05	6.5	44.45	50.90
32	-0.06	6.5	42.80	49.24	68	-0.08	6.5	47.00	53.42
33	-0.08	6.4	39.45	45.77	69	-0.07	6.6	44.75	51.28
34	-0.09	6.4	39.95	46.26	70	-0.07	6.5	46.90	53.33
35	-0.10	6.5	39.25	45.65	71	-0.06	6.4	48.95	55.29

obs: medidas em mm



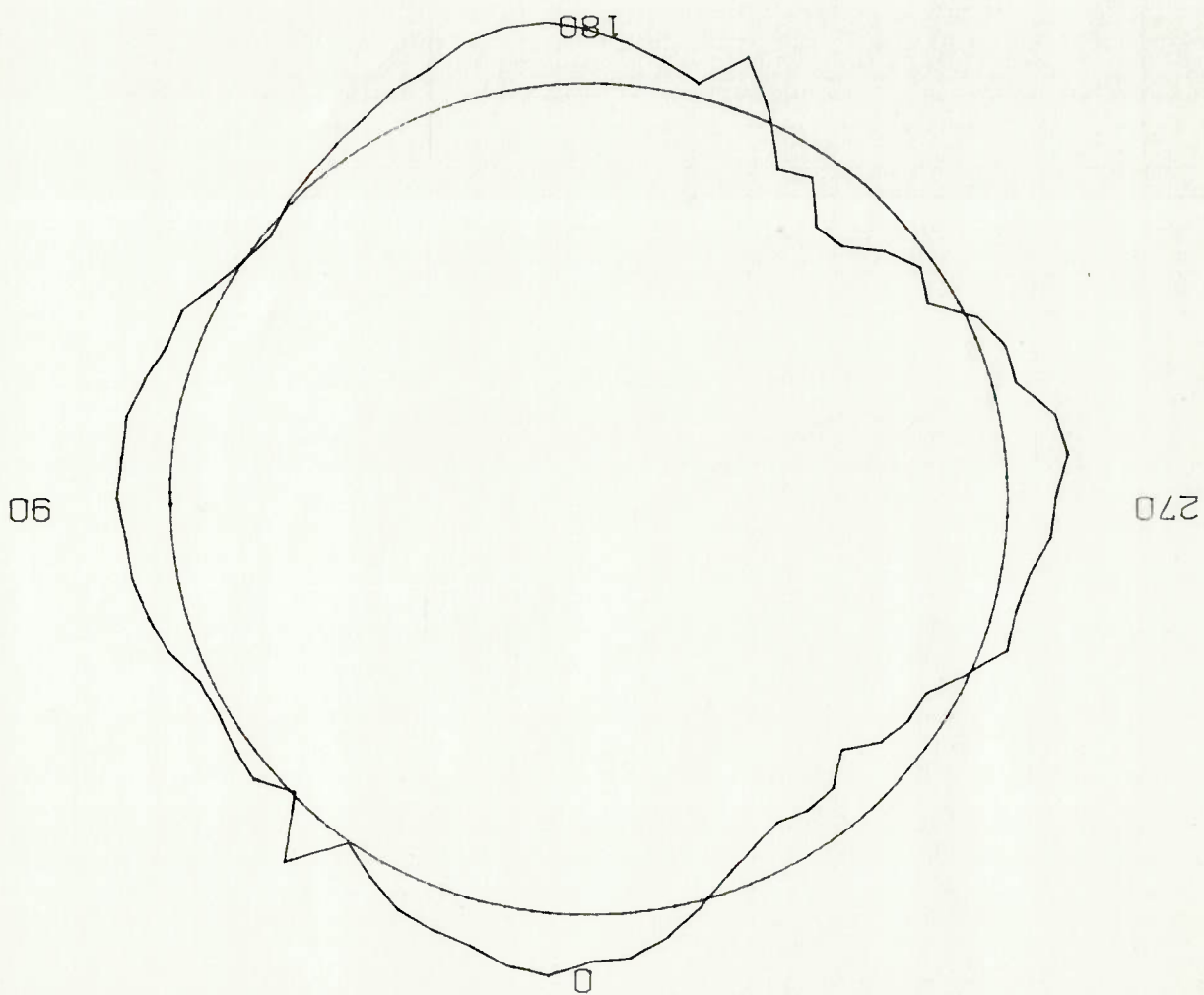


Figura 4.7.a - Representação gráfica da configuração  $C_1$  imposta com a primeira medição de rato

Figura 4.7.b - Representação gráfica da configuração  $C_1$  imposta com a segunda medição de raso

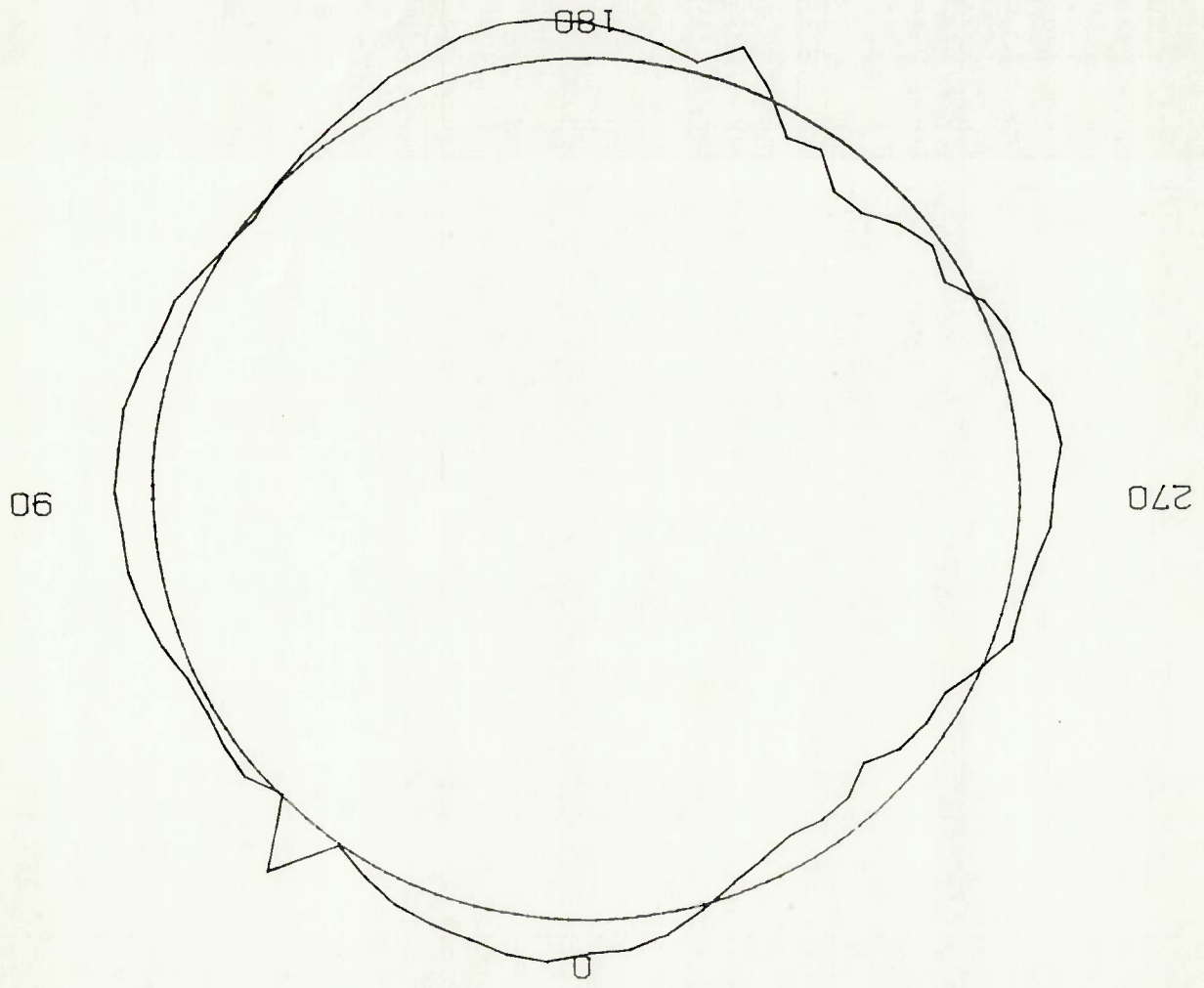
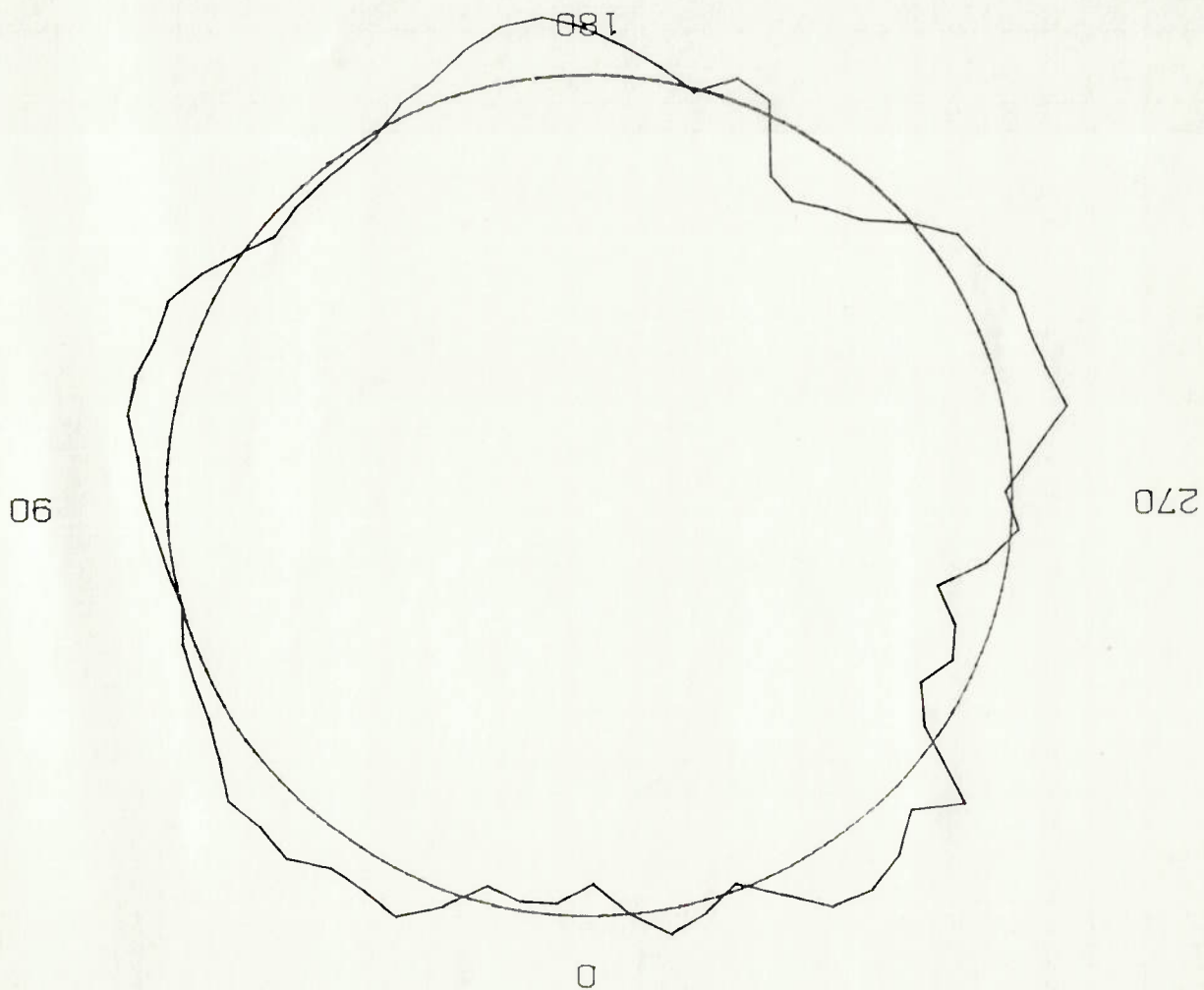


Figura 4.8.a - Representação gráfica da configuração  $C^2$  imposta com a primeira medição de raso



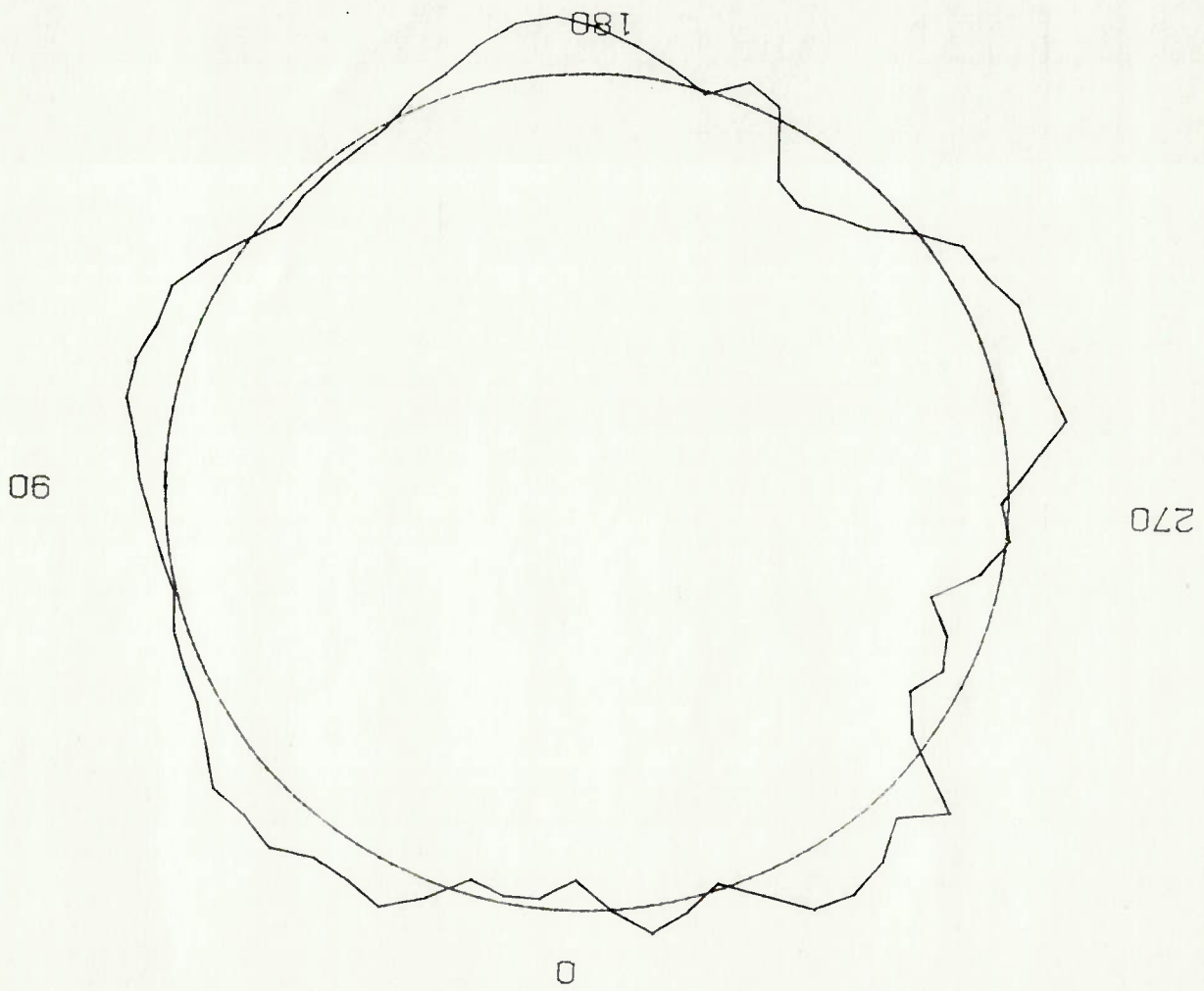


Figura 4.8.b - Representação gráfica da configuração C<sup>2</sup> imposta com a segunda medição de raso



Tabela IV.8 - Valores de falta de circularidade aparente, para cada uma das 64 medições executadas pelo processo do JIG, com a configuração C<sub>1</sub> imposta ao gabarito.

MEDICÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE	MEDICÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE	MEDICÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE
01	5,78	33	5,38		
02	5,55	34	5,53		
03	5,31	35	5,41		
04	5,42	36	5,45		
05	5,42	37	5,63		
06	5,41	38	5,41		
07	5,74	39	5,41		
08	5,66	40	5,41		
09	5,51	41	5,65		
10	5,73	42	5,59		
11	5,56	43	5,65		
12	5,66	44	5,65		
13	5,60	45	5,78		
14	5,38	46	5,90		
15	5,51	47	5,57		
16	5,51	48	5,62		
17	5,53	49	5,38		
18	5,55	50	5,50		
19	5,35	51	5,41		
20	5,46	52	5,41		
21	5,47	53	5,41		
22	5,41	54	5,41		
23	5,74	55	5,41		
24	5,66	56	5,41		
25	5,51	57	5,78		
26	5,56	58	5,59		
27	5,56	59	5,65		
28	5,56	60	5,65		
29	5,51	61	5,78		
30	5,48	62	5,62		
31	5,32	63	5,57		
32	5,57	64	5,62		

Obs: medidas em mm

Tabela IV.9 - Valores de falta de circularidade aparente, para cada uma das 64 medições executadas pelo processo do JIG, com a configuração  $C_2$  imposta ao gabarito.

MEDIÇÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE	MEDIÇÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE	MEDIÇÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE
01	5,82	33	5,32	64	5,32
02	5,82	34	5,32	63	5,51
03	5,76	35	5,37	62	5,32
04	5,62	36	5,43	61	5,32
05	5,70	37	5,37	60	5,32
06	5,32	38	5,43	59	5,32
07	5,70	39	5,82	58	5,32
08	5,45	40	5,82	57	5,32
09	5,26	41	5,76	56	5,32
10	5,32	42	5,59	55	5,32
11	5,57	43	5,70	54	5,32
12	5,51	44	5,32	53	5,32
13	5,26	45	5,32	52	5,32
14	5,37	46	5,51	51	5,32
15	5,32	47	5,37	50	5,37
16	5,37	48	5,32	49	5,57
17	5,26	49	5,32	48	5,32
18	5,32	50	5,37	47	5,37
19	5,43	51	5,32	46	5,51
20	5,43	52	5,32	45	5,32
21	5,37	53	5,32	44	5,32
22	5,43	54	5,32	43	5,70
23	5,26	55	5,32	42	5,59
24	5,37	56	5,32	41	5,76
25	5,32	57	5,32	40	5,82
26	5,57	58	5,32	39	5,82
27	5,70	59	5,32	38	5,43
28	5,51	60	5,32	37	5,37
29	5,20	61	5,32	36	5,43
30	5,37	62	5,32	35	5,37
31	5,43	63	5,51	34	5,32
32	5,37	64	5,32	33	5,32

Obs: medidas em mm

De maneira análoga ao procedimento de qualificação dos outros processos, no procedimento de qualificação da régua em arco, introduziu-se no gabarito, que ainda se encontrava na posição vertical, desta feita, porém somente para uma configuração.

Isto ocorreu, devido a verificação de que, a configuração:

$$C^2 = 4 \cos \theta + 2 \sin \theta + 3 \cos \theta + 5 \sin \theta \quad (\text{mm});$$

pode ser considerada a mais conservadora, e, trabalhando a favor da segurança, BUELTA, MASSAROTTI e SOUZA [20] decidiram utilizar esta configuração no processo de qualificação da régua em arco.

A imposição e a medição da configuração, foram executadas de maneira análoga ao que foi executado no procedimento de qualificação do JIG. Utilizou-se da mesma medição de raios da superfície de referência, apenas executando-se uma verificação dos valores, de maneira a garantir que não houvesse ocorrido nenhuma alteração.

Na análise dos resultados, utilizou-se o programa CIRSUBRO, desenvolvido especialmente para as régua em arco. Este programa utiliza a metodologia de cálculo proposta por BUELTA e FRANTZA [10], descrita no item III.4.4.

Este procedimento básico foi utilizado para os dois tipos de régua em arco, como é descrito a seguir.

Como já foi dito, impôs-se a configuração com os valores de off-sets que podem ser vistos nas tabelas IV.10.a e b.

Nas tabelas C.1, C.2, C.3 e C.4 do apêndice C, são mostrados os resultados dos processamentos do programa CIRSUBRO, a otimização do centro e raio e as componentes da série de Fourier, respectivamente, para a primeira e a segunda medições de raio da configuração  $C_2$ , que são os dados das tabelas IV.10.a e b, respectivamente, e estão graficamente representadas nas figuras 4.9.a e b.

Os valores de falta de circularidade aparente, foram obtidos a partir das 64 medições executadas para a configuração imposta, utilizando-se o processo desenvolvido por BUELTA e FRANTZA, descrito no item III.4.4.

Na tabela IV.11, são apresentados os valores das faltas de circularidade aparentes, referente as 64 medições executadas para a configuração imposta,  $C_2$ , e que serão posteriormente comparados com o valor de falta de circularidade verdadeira.



Tabela IV.10.a - Resultados da totalização dos valores de valores dos off-sets totais para a configuração C<sup>2</sup> (primeira medição dos raios).

Pto	med. rato	esp. chapa	off-set	Total	Pto	med. rato	esp. chapa	off-set	Total
0	-0.04	6.5	50.85	57.31	24	-0.11	6.5	44.90	51.29
1	0.04	6.5	51.55	58.09	25	-0.10	6.5	44.00	50.40
2	0.01	6.6	51.50	58.11	26	-0.09	6.5	40.30	46.71
3	0.05	6.4	51.60	58.05	27	-0.07	6.4	34.10	40.43
4	0.06	6.4	49.00	55.46	28	-0.02	6.4	34.75	41.13
5	0.05	6.5	48.30	54.85	29	0.00	6.4	36.60	43.00
6	0.04	6.5	46.40	52.95	30	0.03	6.4	32.80	39.23
7	0.08	6.6	47.60	54.28	31	0.07	6.4	37.75	44.22
8	0.09	6.4	47.70	54.19	32	0.11	6.4	36.60	42.51
9	0.11	6.5	50.35	56.96	33	0.11	6.4	40.55	47.06
10	0.06	6.5	50.00	56.56	34	0.08	6.4	41.65	48.13
11	0.04	6.5	53.20	59.74	35	0.08	6.4	45.60	52.08
12	0.01	6.5	50.90	57.41	36	0.07	6.4	44.90	51.37
13	0.03	6.5	51.20	57.73	37	0.03	6.5	47.75	54.28
14	0.02	6.4	48.50	54.92	38	0.02	6.4	43.30	49.72
15	0.10	6.4	48.30	54.80	39	-0.09	6.5	41.70	48.25
16	0.09	6.5	44.70	51.29	40	0.03	6.5	39.10	45.63
17	0.08	6.4	47.20	53.68	41	0.03	6.5	39.65	46.18
18	0.05	6.3	42.70	49.05	42	0.01	6.3	37.10	43.41
19	0.02	6.5	41.35	47.87	43	-0.03	6.4	39.50	45.87
20	-0.01	6.5	43.80	50.29	44	-0.05	6.6	40.00	46.55
21	-0.05	6.5	47.45	53.90	45	-0.10	6.5	45.90	52.30
22	-0.11	6.4	45.60	51.89	46	-0.11	6.6	46.00	52.49
23	-0.10	6.4	43.60	49.90	47	-0.07	6.5	53.08	59.51

Obs: medidas em mm

Tabela IV.10.b - Resultados da totalização dos valores de valores dos off-sets totais para a configuração C<sup>2</sup> (segunda medição dos raios).

Pto	med. rato	esp. chapa	off-set	Total	Pto	med. rato	esp. chapa	off-set	Total
0	-0.11	6.5	6.5	51.55	24	-0.10	6.5	44.90	51.30
1	-0.06	6.5	6.5	51.50	25	-0.11	6.5	44.00	50.39
2	0.03	6.6	6.4	51.60	26	-0.11	6.5	40.30	46.69
3	0.01	6.4	6.4	51.60	27	-0.09	6.4	34.10	40.41
4	0.03	6.4	6.4	49.00	28	-0.06	6.4	34.75	41.09
5	0.04	6.5	6.4	48.30	29	-0.03	6.4	36.60	42.97
6	0.06	6.5	6.4	46.40	30	0.01	6.4	32.80	39.21
7	0.11	6.6	6.4	47.60	31	0.05	6.4	37.75	44.20
8	0.10	6.4	6.4	47.70	32	0.07	6.4	36.60	42.47
9	0.11	6.5	6.4	50.35	33	0.11	6.4	40.55	47.06
10	0.09	6.5	6.4	50.00	34	0.11	6.4	41.65	48.16
11	0.06	6.5	6.4	53.20	35	0.11	6.4	45.60	52.11
12	0.05	6.5	6.5	50.90	36	0.09	6.4	44.90	51.39
13	0.05	6.5	6.5	51.20	37	0.10	6.5	47.75	54.35
14	0.06	6.4	6.4	48.50	38	0.09	6.4	43.30	49.79
15	0.09	6.4	6.5	48.30	39	0.09	6.5	41.70	48.29
16	0.10	6.5	6.5	44.70	40	0.08	6.5	39.10	45.68
17	0.09	6.4	6.5	47.20	41	0.06	6.5	39.65	46.21
18	0.05	6.3	6.3	42.70	42	0.03	6.3	37.10	43.43
19	0.03	6.5	6.4	41.35	43	0.01	6.4	39.50	45.91
20	-0.01	6.5	6.6	43.80	44	-0.04	6.6	40.00	46.56
21	-0.05	6.5	6.5	47.45	45	-0.06	6.5	45.90	52.34
22	-0.08	6.4	6.5	45.60	46	-0.07	6.6	46.00	52.53
23	-0.10	6.4	6.5	43.60	47	-0.07	6.5	53.08	59.51

Obs: medidas em mm

Figura 4.9.a - Representação gráfica da configuração  $C_2$  imposta com a prismeta medição de ralo

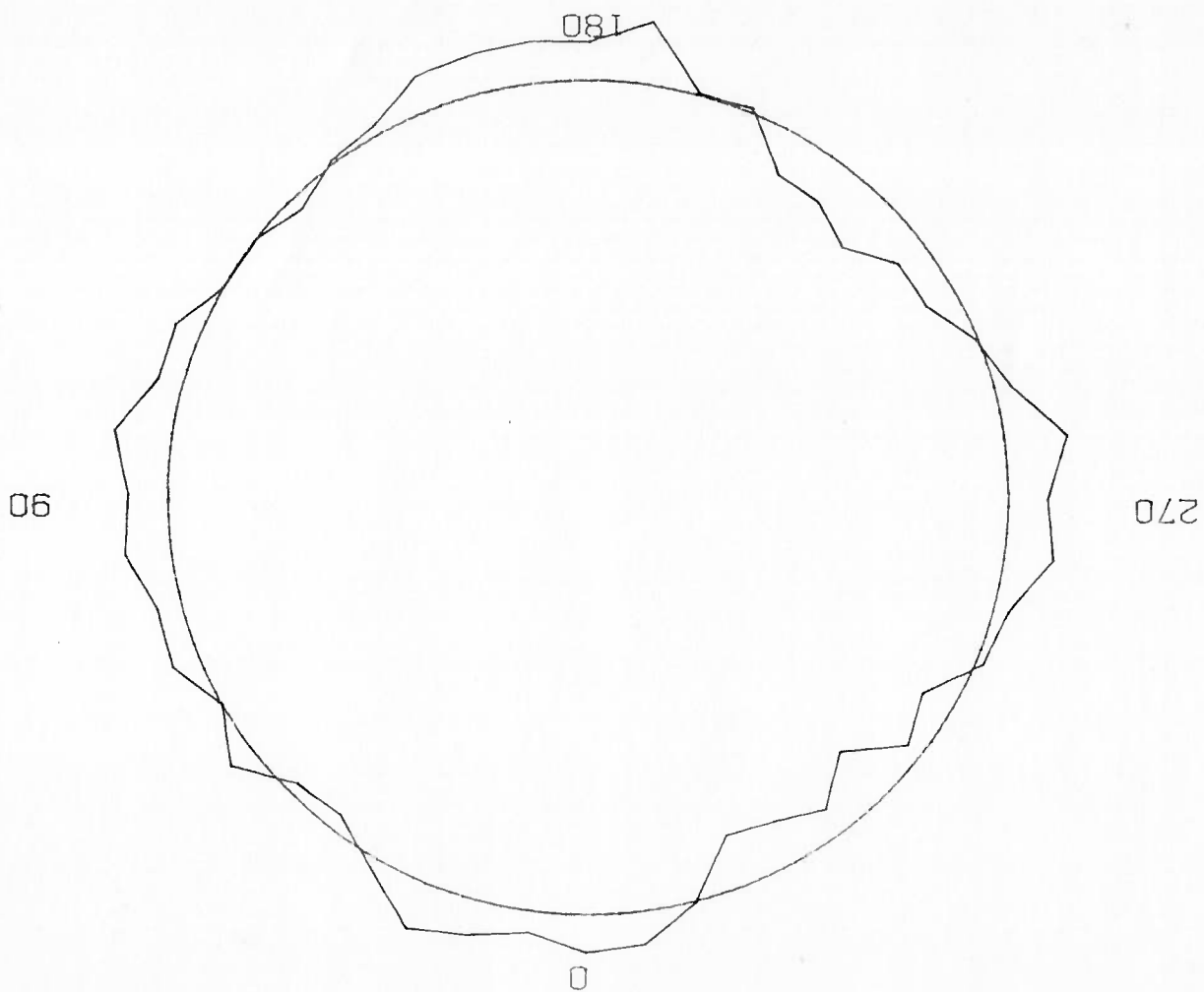


Figura 4.9.b - Representação gráfica da configuração  $C_2$  imposta com a segunda medição de ralo

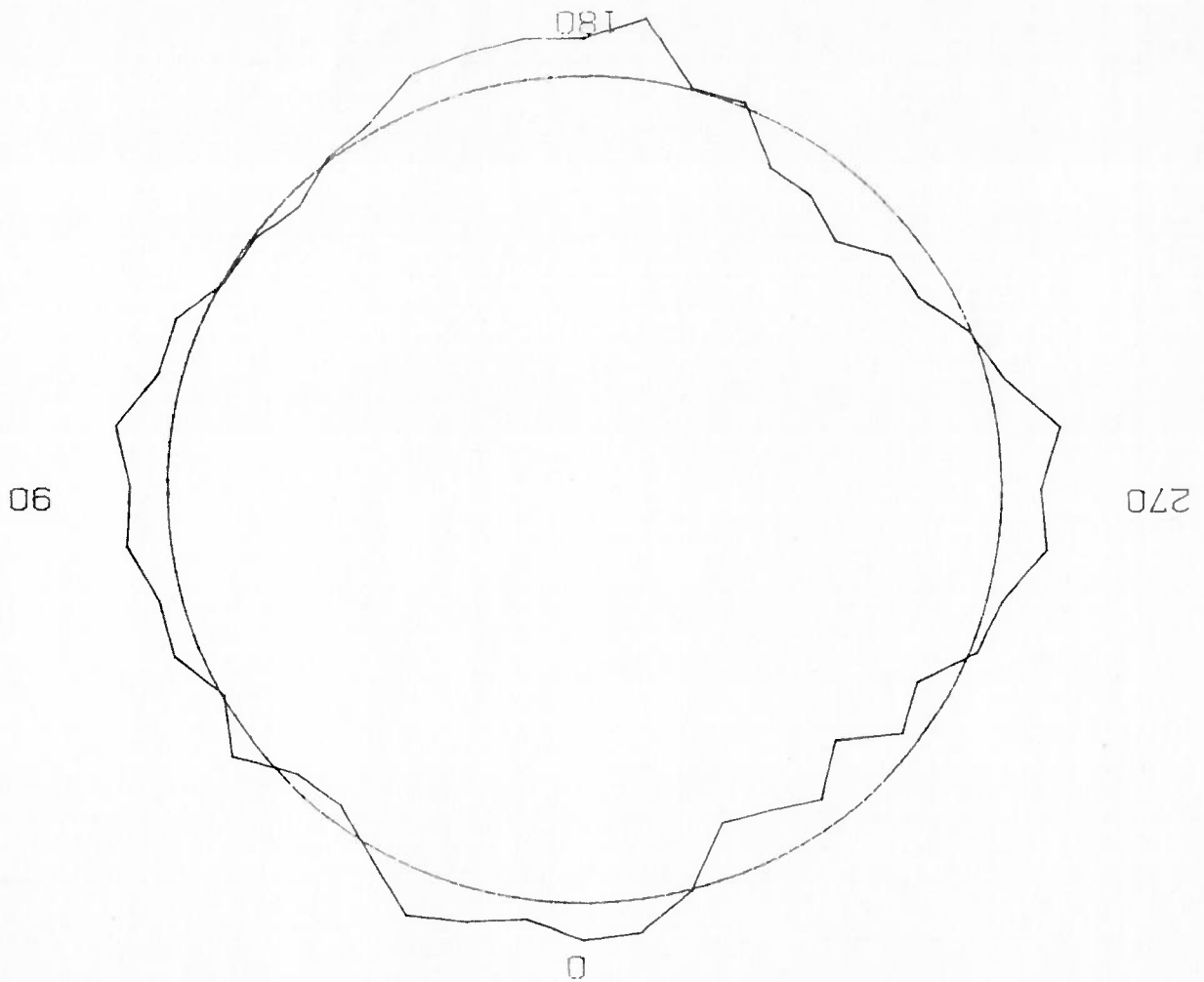




Tabela IV.11 - Valores de falta de circularidade aparente, para cada uma das 64 medições executadas pelo processo da régua em arco analógica, com a configuração  $C_2$  imposta ao gabarito.

MEDIÇÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE	MEDIÇÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE
01	6,35	33	6,58
02	6,49	34	6,50
03	6,48	35	6,44
04	6,32	36	6,55
05	6,53	37	6,55
06	6,37	38	6,40
07	6,31	39	6,33
08	6,42	40	6,57
09	6,31	41	6,39
10	6,38	42	6,54
11	6,24	43	6,34
12	6,30	44	6,32
13	6,23	45	6,54
14	6,35	46	6,28
15	6,43	47	6,35
16	6,37	48	6,43
17	6,41	49	6,46
18	6,37	50	6,43
19	6,32	51	6,34
20	6,48	52	6,39
21	6,29	53	6,36
22	6,41	54	6,27
23	6,27	55	6,27
24	6,40	56	6,40
25	6,34	57	6,27
26	6,42	58	6,32
27	6,29	59	6,35
28	6,28	60	6,38
29	6,47	61	6,38
30	6,38	62	6,31
31	6,51	63	6,29
32	6,43	64	6,40

Obs: medidas em mm

Análogamente ao processo de qualificação da régua em arco

analógica, dito anteriormente, impôs-se a configuração com os valores de off-sets que podem ser vistos nas tabelas IV.12.a e

b.

Nas tabelas D.1, D.2, D.3 e D.4 do apêndice D, são mostrados os resultados dos processamentos do programa CIRSUBRO, a otimização do centro e raio e as componentes da série de Fourier, respectivamente, para a primeira e a segunda medições de raio da configuração  $C_2$ , que são os dados das tabelas IV.12.a e b, respectivamente. Essa configuração e suas medições de raio estão representadas nas figuras 4.10.a e b.

Os valores de falta de circularidade aparente, foram obtidos a partir das 64 medições executadas para a configuração imposta, utilizando-se o mesmo processo utilizado para a régua em arco analógica, sendo apresentados na tabela IV.13 estes valores das faltas de circularidade aparentes, e que serão posteriormente comparados com o valor de falta de circularidade verdadeira.

Tabela IV.12.a- Resultados da totalização dos valores de valores dos off-sets totais para a configuração C<sub>2</sub> (primeira medição dos raios).

Pto	med. rato	esp. chapa	off-set	Total	Pto	med. rato	esp. chapa	off-set	Total
0	-0.04	6.5	50.90	57.31	24	-0.11	6.5	44.90	51.29
1	0.04	6.5	51.60	58.14	25	-0.10	6.5	44.20	50.60
2	0.01	6.6	51.55	58.16	26	-0.09	6.5	40.30	46.71
3	0.05	6.4	51.70	58.15	27	-0.07	6.4	34.15	40.48
4	0.06	6.4	49.00	55.46	28	-0.02	6.4	34.70	41.18
5	0.05	6.5	48.35	54.90	29	0.00	6.4	36.70	43.10
6	0.04	6.5	46.85	53.40	30	0.03	6.4	32.85	39.28
7	0.08	6.6	47.60	54.28	31	0.07	6.4	37.75	44.22
8	0.09	6.4	47.70	54.19	32	0.11	6.4	36.00	42.51
9	0.11	6.5	50.25	56.86	33	0.11	6.4	40.50	47.11
10	0.06	6.5	50.00	56.56	34	0.08	6.4	41.65	48.13
11	0.04	6.5	53.20	59.74	35	0.08	6.4	45.80	52.28
12	0.01	6.5	50.90	57.41	36	0.07	6.4	44.90	51.37
13	0.03	6.5	51.15	57.68	37	0.03	6.5	47.60	54.13
14	0.02	6.4	48.40	54.82	38	0.02	6.4	43.30	49.72
15	0.10	6.4	48.15	54.65	39	-0.09	6.5	41.60	48.35
16	0.09	6.5	44.70	51.29	40	0.03	6.5	39.10	45.58
17	0.08	6.4	47.25	53.73	41	0.03	6.5	39.65	46.18
18	0.05	6.3	42.60	48.95	42	0.01	6.3	37.10	43.41
19	0.02	6.5	41.40	47.92	43	-0.03	6.4	39.50	45.77
20	-0.01	6.5	43.80	50.29	44	-0.05	6.6	40.00	46.55
21	-0.05	6.5	47.60	54.05	45	-0.10	6.5	45.90	52.40
22	-0.11	6.4	45.70	51.99	46	-0.11	6.6	46.00	52.49
23	-0.10	6.4	43.65	49.95	47	-0.07	6.5	53.08	59.51

Obs: medidas em mm

Tabela IV.12.b- Resultados da totalização dos valores de valores dos off-sets totais para a configuração  $C^2$  (segunda medição dos raios).

Pto	med. ratio	esp. chapa	off- set	Total	Pto	med. ratio	esp. chapa	off- set	Total
0	-0.11	6.5	50.90	57.24	24	-0.10	6.5	44.90	51.30
1	-0.06	6.5	51.60	57.99	25	-0.11	6.5	44.20	50.39
2	0.03	6.6	51.55	58.07	26	-0.11	6.5	40.30	46.69
3	0.01	6.4	51.70	58.01	27	-0.09	6.4	34.15	40.41
4	0.03	6.4	49.00	55.43	28	-0.06	6.4	34.70	41.09
5	0.04	6.5	48.35	54.84	29	-0.03	6.4	36.70	42.97
6	0.06	6.5	46.85	52.96	30	0.01	6.4	32.85	39.21
7	0.11	6.6	47.60	54.31	31	0.05	6.4	37.75	44.20
8	0.10	6.4	47.70	54.20	32	0.07	6.4	36.00	42.47
9	0.11	6.5	50.25	56.96	33	0.11	6.4	40.50	47.06
10	0.09	6.5	50.00	56.59	34	0.11	6.4	41.65	48.16
11	0.06	6.5	53.20	59.76	35	0.11	6.4	45.80	52.11
12	0.05	6.5	50.90	57.45	36	0.09	6.4	44.90	51.39
13	0.05	6.5	51.15	57.75	37	0.10	6.5	47.60	54.35
14	0.06	6.4	48.40	54.96	38	0.09	6.4	43.30	49.79
15	0.09	6.4	48.15	54.79	39	0.09	6.5	41.60	48.29
16	0.10	6.5	44.70	51.30	40	0.08	6.5	39.05	45.68
17	0.09	6.4	47.25	53.69	41	0.06	6.5	39.65	46.21
18	0.05	6.3	42.60	49.05	42	0.03	6.3	37.10	43.43
19	0.03	6.5	41.40	47.88	43	0.01	6.4	39.40	45.91
20	-0.01	6.5	43.80	50.29	44	-0.04	6.6	40.00	46.56
21	-0.05	6.5	47.60	53.90	45	-0.06	6.5	46.00	52.34
22	-0.08	6.4	45.70	51.92	46	-0.07	6.6	46.00	52.53
23	-0.10	6.4	43.65	49.90	47	-0.07	6.5	52.94	59.51

Obs: medidas em mm



Figura 4.10.a - Representação gráfica da configuração  $C_2$  imposta com a prismeta medição de ralo

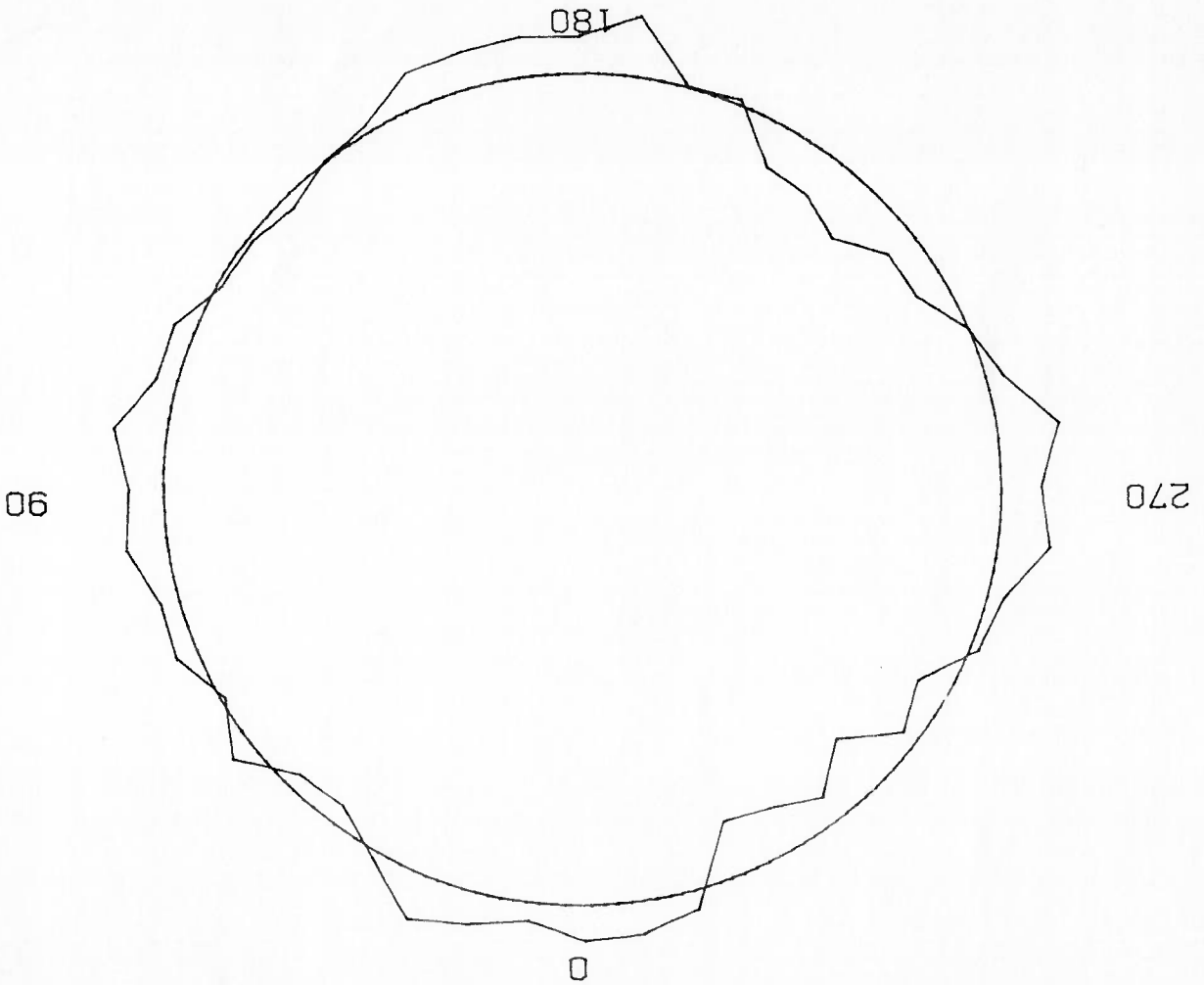


Figura 4.10.b - Representação gráfica da configuração  $C_2$  imposta com a segunda medição de rato

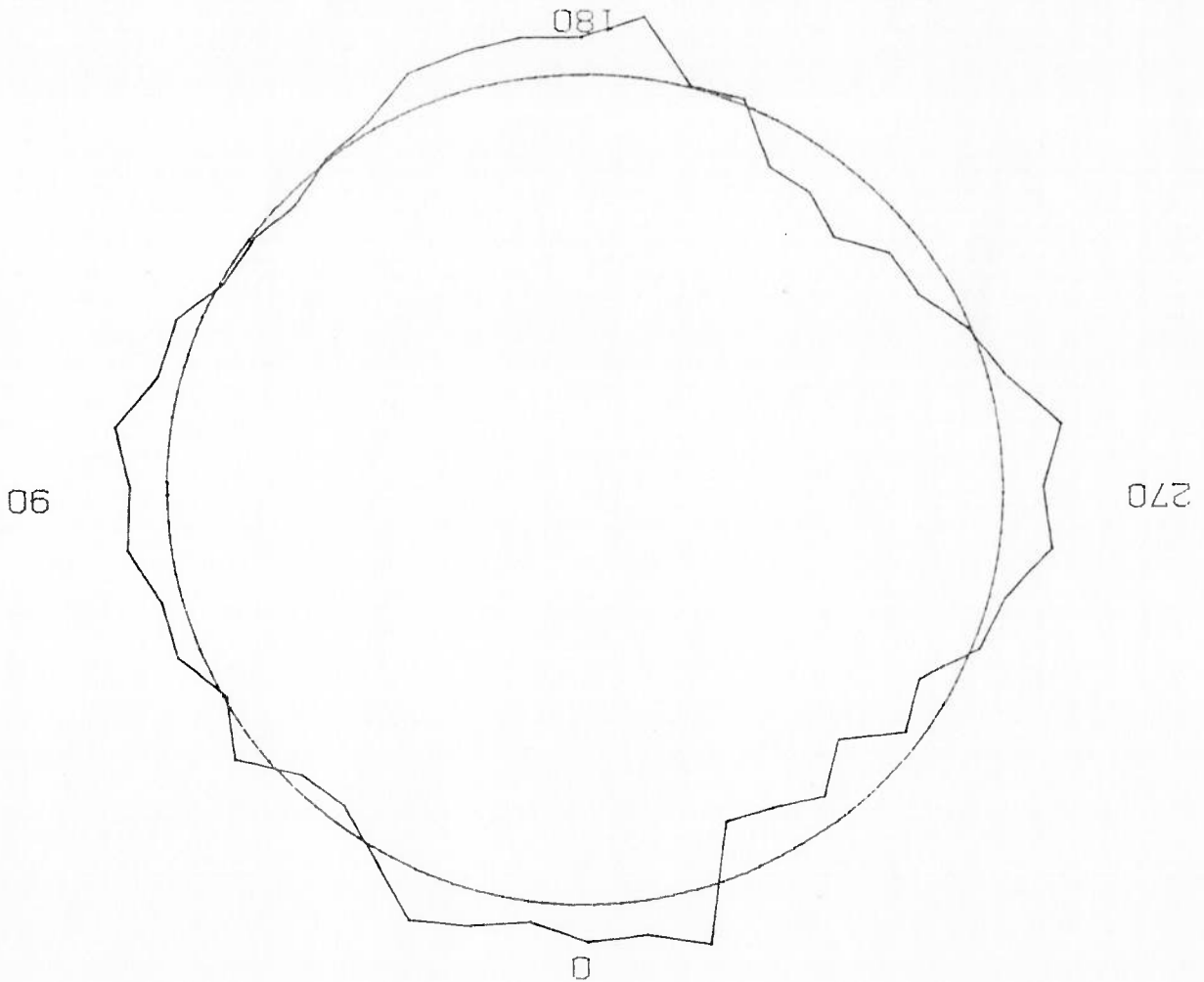


Tabela IV.13 - Valores de falta de circularidade aparente, para cada uma das 64 medições executadas pelo processo da régua em arco digital, com a configuração C<sup>2</sup> imposta ao gabarito.

MEDICÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE	MEDICÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE	MEDICÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE APARENTE
01	5,99	36	6,24		
02	6,01	37	6,25		
03	6,31	38	6,02		
04	6,44	39	6,05		
05	6,31	40	5,99		
06	6,23	41	6,17		
07	6,31	42	6,21		
08	6,33	43	6,32		
09	6,49	44	6,28		
10	6,54	45	6,38		
11	6,51	46	6,32		
12	6,47	47	6,06		
13	6,44	48	6,18		
14	6,45	49	6,26		
15	6,45	50	6,30		
16	6,45	51	6,25		
17	6,37	52	6,36		
18	6,33	53	6,41		
19	6,25	54	6,29		
20	6,21	55	6,18		
21	6,20	56	6,16		
22	6,34	57	6,29		
23	6,33	58	6,43		
24	6,38	59	6,36		
25	6,23	60	6,37		
26	6,25	61	6,27		
27	6,33	62	6,11		
28	6,31	63	6,15		
29	6,18	64	6,34		
30	6,05	65	6,21		
31	6,06	66	6,21		
32	6,04	67	6,44		
33	6,12	68	6,40		
34	6,13	69	6,35		
35	6,27	70	6,30		

Obs: medidas em mm

De um modo geral, durante toda a qualificação dos três processos básicos de medição, compasso, jíg, régua em arco (digital e analógica), obtve-se a qualificação dos operadores simultaneamente com a qualificação do processo. Conforme visto no capítulo IV.2.2, o processo consistia em aprovar um operador que conseguisse em 20 medições, no mínimo 18 medições dentro do intervalo de erro do processo.

No processo do compasso, utilizou-se 2 operadores para a qualificação do processo, cada um executando 64 medições, número bastante elevado se comparado com as 20 necessárias, este fato incidu na aceitação dos operadores como qualificados.

Fato semelhante ocorreu para o processo do jíg, porém utilizou-se 5 operadores, cada um executando 32 medições, sendo que as excedentes não foram levadas em consideração na qualificação do processo. O fato de existirem 32 medições excedentes se deve a ocorrência de problemas de saúde com um operador, sendo necessário a utilização de um operador reserva para completar as medições e qualificando-se este com suas 32 medições excedidas.

Já durante o processo de qualificação da régua em arco analógica, utilizou-se 2 operadores qualificados no processo da régua em arco para submarinos classe GUPPY da MB, cada qual executando 32 medições, e qualificou-se um terceiro operador com 20 medições, das quais 19 estavam no intervalo aceitável. A título de exemplificação da validade do processo de qualificação de operadores, na tabela IV.14 têm-se a amostra das 20 medidas executadas e o valor do erro máximo admissível.

No processo da régua em arco digital utilizou-se os mesmos operadores utilizados na qualificação da régua em arco analógica, cada um executando 32 medições.



Tabela IV.14 - Amostra das 20 medições executadas no processo de qualificação de um operador do processo da régua em arco analógica.

MEDIDAÇÃO	FALTA DE CIRCULARIDADE
1	6,58
2	6,42
3	6,39
4	6,18
5	6,48
6	6,51
7	6,42
8	6,36
9	6,39
10	6,44
11	6,35
12	6,53
13	6,37
14	6,38
15	6,31
16	6,37
17	6,56
18	6,58
19	6,67
20	6,37

Obs: Medidas em mm

Intervalo de aprovação  $6,75 \pm 0,52$  mm, portanto medição nº 4 reprovada.

## IV.4 - PROBLEMAS ENCONTRADOS DURANTE A QUALIFICAÇÃO

## IV.4.1 - COMPASSO

O processo do compasso é basicamente um processo simples, sem grandes dificuldades. Porém, durante o processo de qualificação, houve um impacto com a chapa simuladora de casco, em um acidente ocorrido durante uma movimentação de carga na NUCLEP. Este impacto gerou desvios maiores na região situada entre os ângulos  $225^\circ$  e  $240^\circ$ .

A recuperação dessa área da chapa, executando-se operações consecutivas de prensagem e calandragem, não minimizou o efeito do acidente, a ponto de torná-lo imperceptível ao compasso, porém, não houve qualquer dano ao procedimento de qualificação do mesmo.

## IV.4.2 - JIG

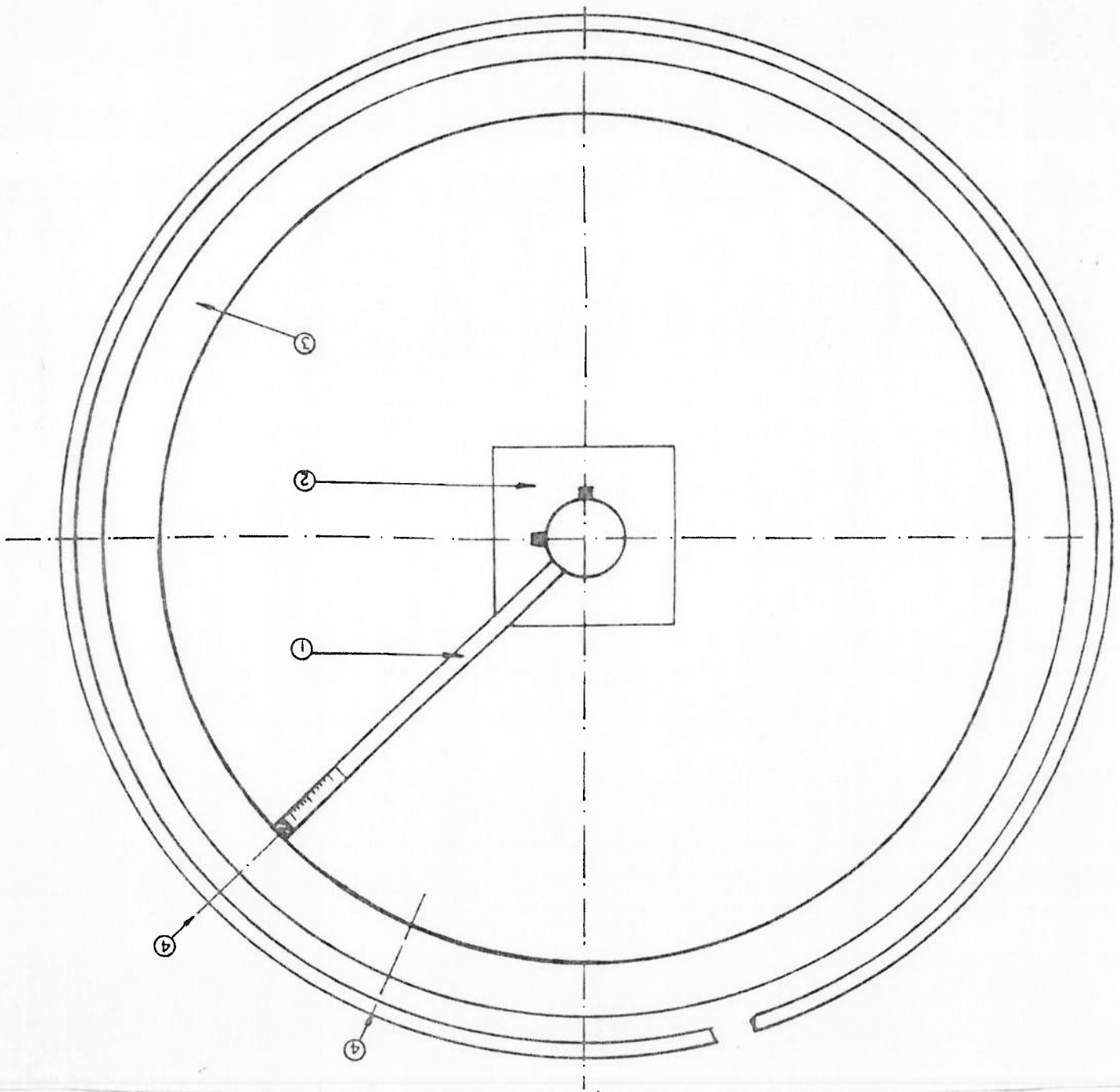
Como já foi mencionado no item IV.3.2, durante a qualificação do processo de JIG, verificou-se uma deformação no círculo de referência do gabarito NUCLEP.

Esta deformação foi ocasionada pela mudança de posição do gabarito, que estava na posição horizontal passando, neste processo de qualificação, para a posição vertical. O mesmo sofreu a ação do peso próprio, na sua estrutura de baixa rigidez, ocasionando as deformações mencionadas.

Para determinar essas deformações, lançou-se mão do seguinte procedimento:

- Mediram-se os raios da superfície de referência, em estações de  $5\text{ em }5^\circ$ , partindo-se de um certo parafuso. - Utilizou-se para a execução desse trabalho, uma mesa de centragem e um micrômetro, como mostrado na figura 4.11;

Após a execução desta medição, duas vezes, processou-se como já foi citado no item IV.3.2, os programas CIRSUBD, ESCOAMEN e além desses, obteve-se a visualização gráfica do círculo de referência deformado, utilizando-se o DRAWKL, como pode-se verificar nas figuras 4.12 e 4.13.



- ① paquímetro
- ② mesa de centragem
- ③ círculo perfeito do gabarito NUCLEP
- ④ estôques onde mediu-se os raios

Figura 4.11 - Verificação dos raios, utilizando-se o paquímetro e a mesa de centragem.

Figura 4.12 - Configuração do círculo de referência na prisma medição de raios.

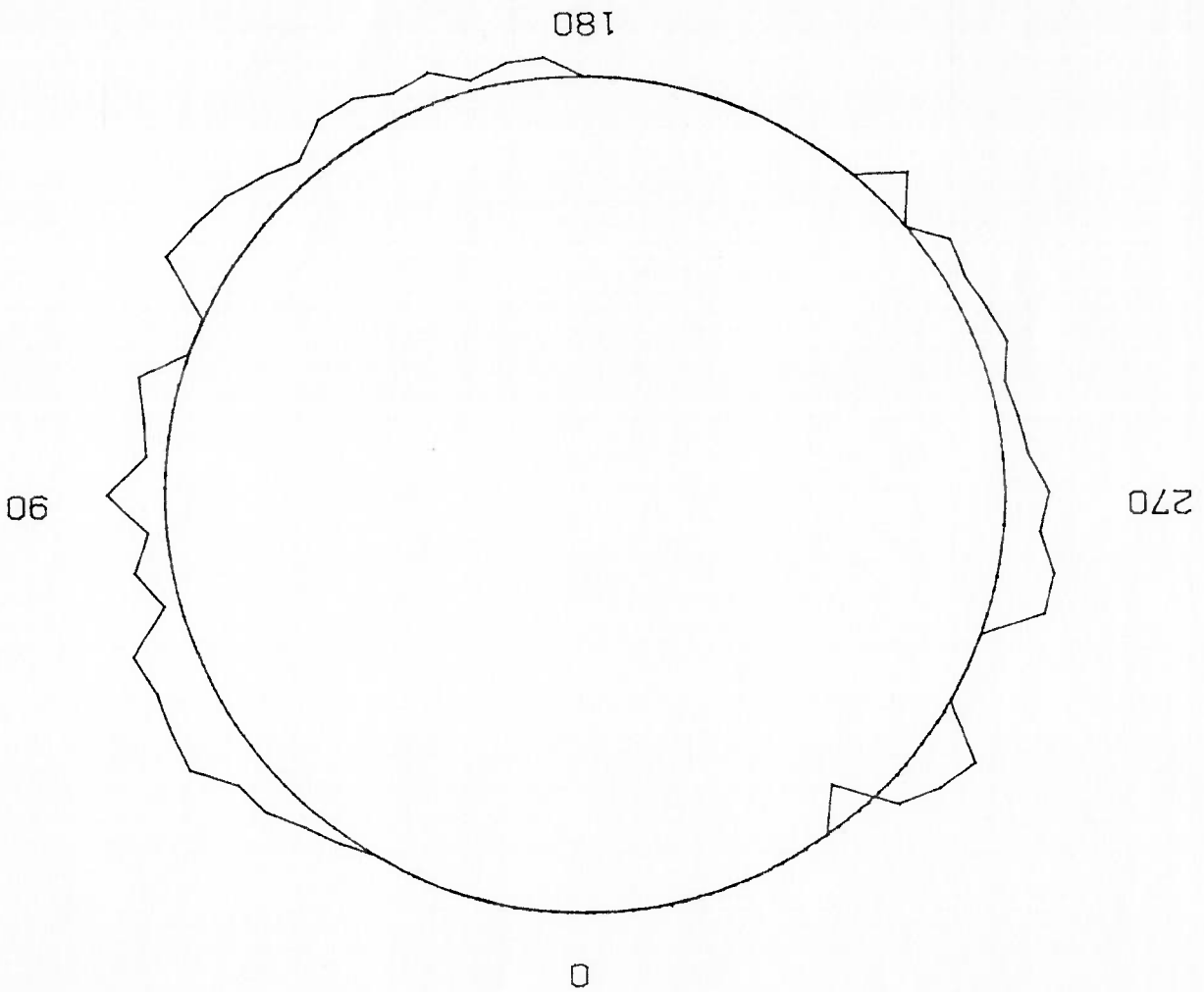
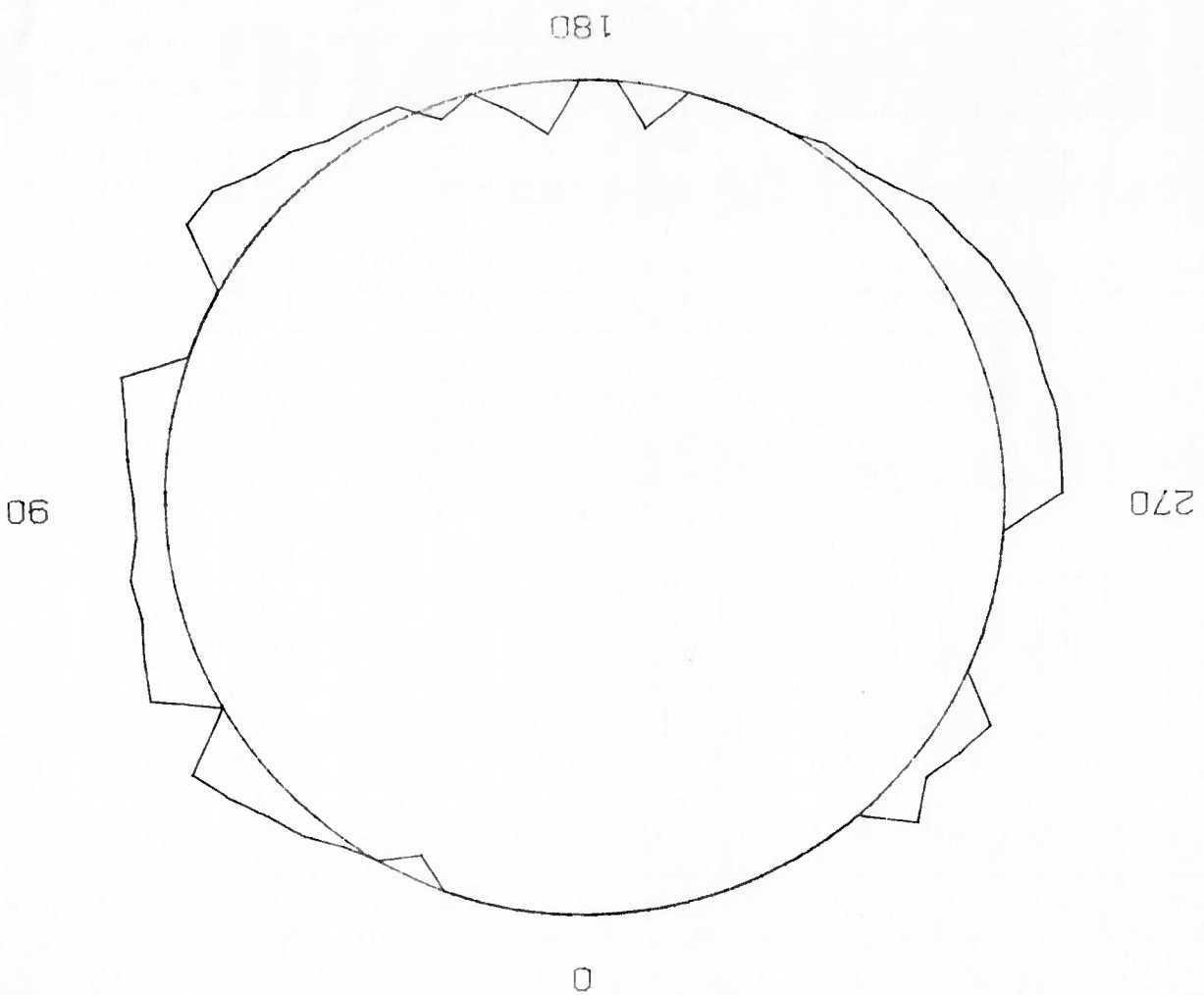




Figura 4.13 - Configuração do círculo de referência na segunda medição de raios.



Durante o procedimento de qualificação da régua em arco analógica, verificou-se que segundo o método descrito em III.4.2, o posicionamento da pata traseira, coincidia com o vão, situado entre  $350$  e  $355$ , como pode ser visto no detalhe da figura 4.14, durante a medição da estação de número 45.

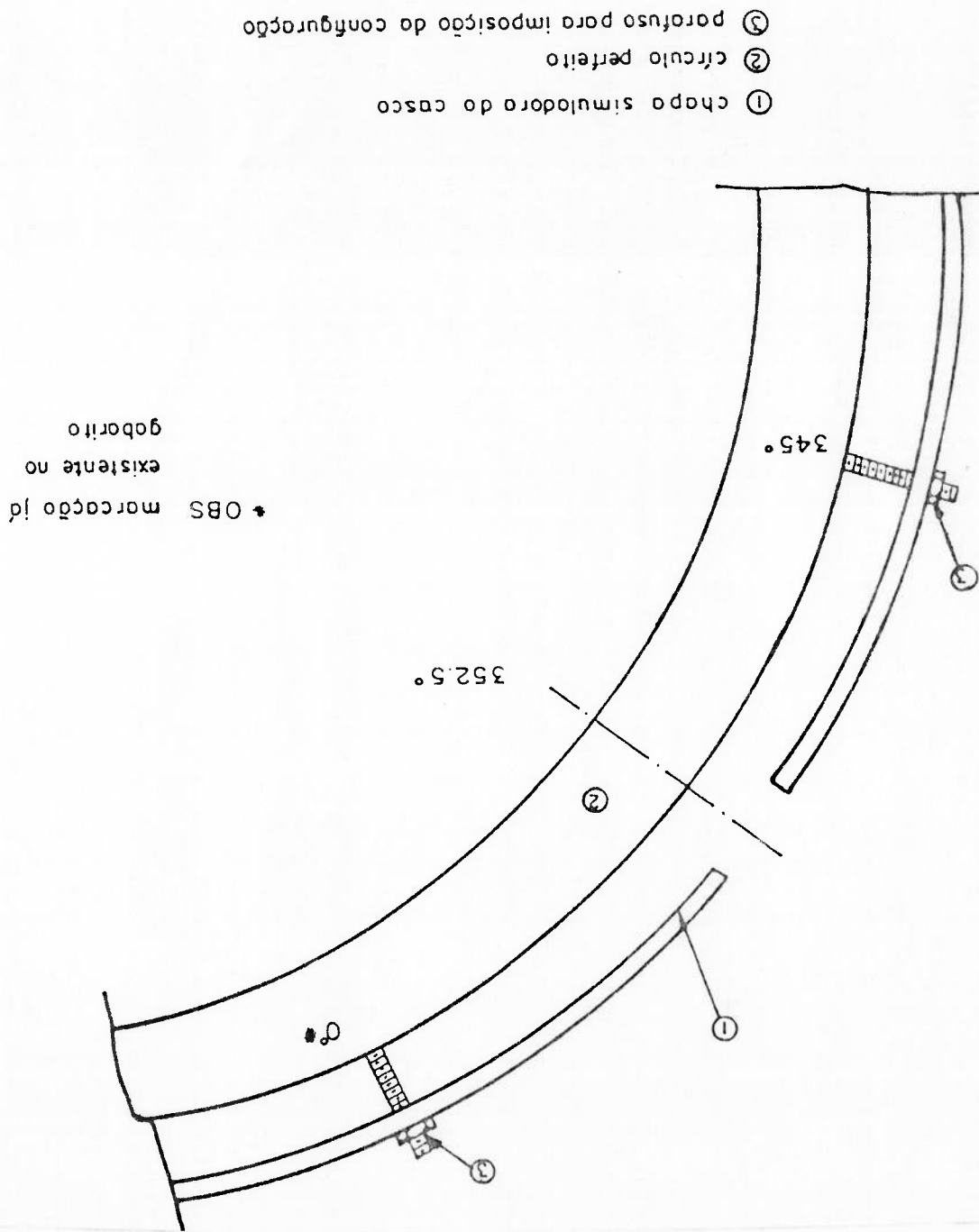
De maneira a solucionar este problema, foi fabricado um calço de madeira nas mesmas dimensões mostradas na figura 4.15, que serviria de apoio à pata traseira, quando esta se posicionasse neste ponto.

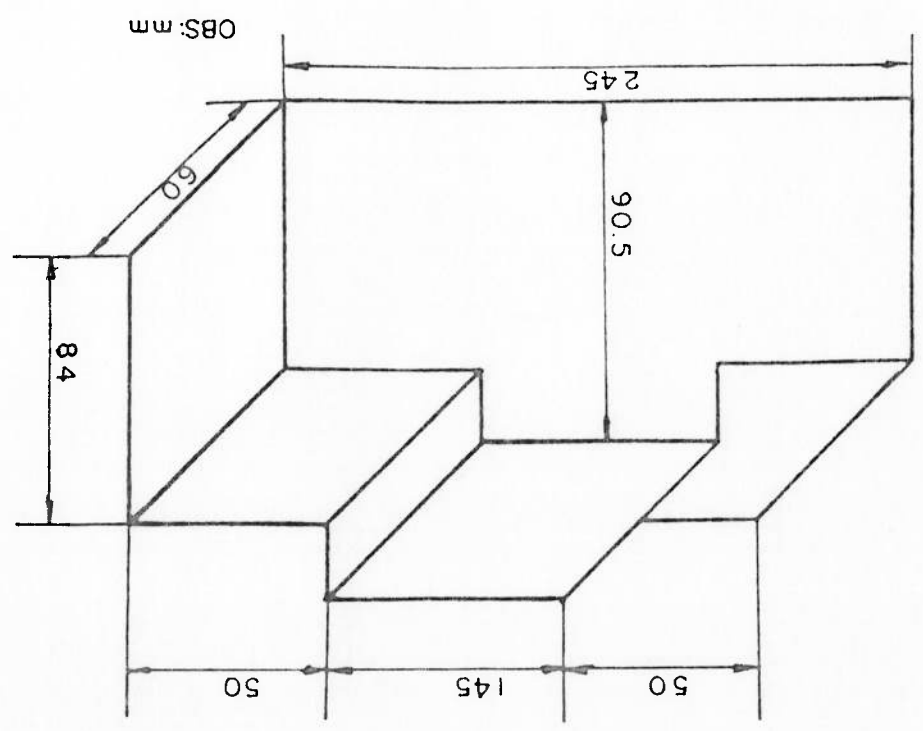
Verificou-se, também, que o "overlap", ou seja, no caso a distância entre a estação 0 e a 48, era elevado, na ordem de  $150\text{mm}$ , o que levou a conclusão de que o raio do gabarito era inferior ao raio de construção da régua, e consequentemente do submarino, em  $20\text{mm}$ . Porém, na tentativa de impor-se ao gabarito uma configuração com o raio correto do submarino, ou seja o raio de projeto da régua, verificou-se que o mesmo possuía uma deficiência construtiva, que impediu essa modificação, tendo que se converter com o overlap de  $150\text{mm}$ .

Ainda com o intuito de solucionar o problema do posicionamento da pata traseira no vão do gabarito foi determinada a rotação do ponto inicial de marcação da régua em arco, ou seja a estação 0, em  $15^\circ$ , como mostra a figura 4.16, o que graças ao overlap elevado, fez com que o posicionamento da pata traseira fosse em um ponto mais distante do vão, finalizando o problema.

Além desse problema com o posicionamento, que foi resolvido com certa facilidade, uma dificuldade que se mostrou bastante influente, foi a dificuldade de leitura do paquímetro de profundidade em determinados pontos do gabarito. Estes pontos possuem pouca luminosidade, gerando, por vezes, leituras errôneas, que foram reexecutadas pelo mesmo operador, depois de comparadas com as outras leituras, já executadas, desse mesmo ponto.

Figura 4.14 - Posicionamento do vão da chapa simuladora do casco no gabarito NUCLEP.





DETALHE DE INSTALAÇÃO

- ① círculo perfeito
- ② calço instalado
- ③ chopo simuladora

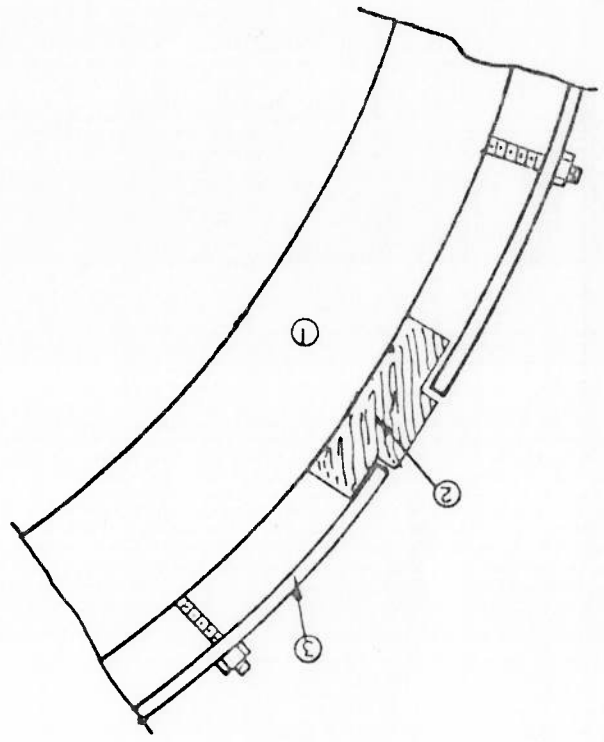
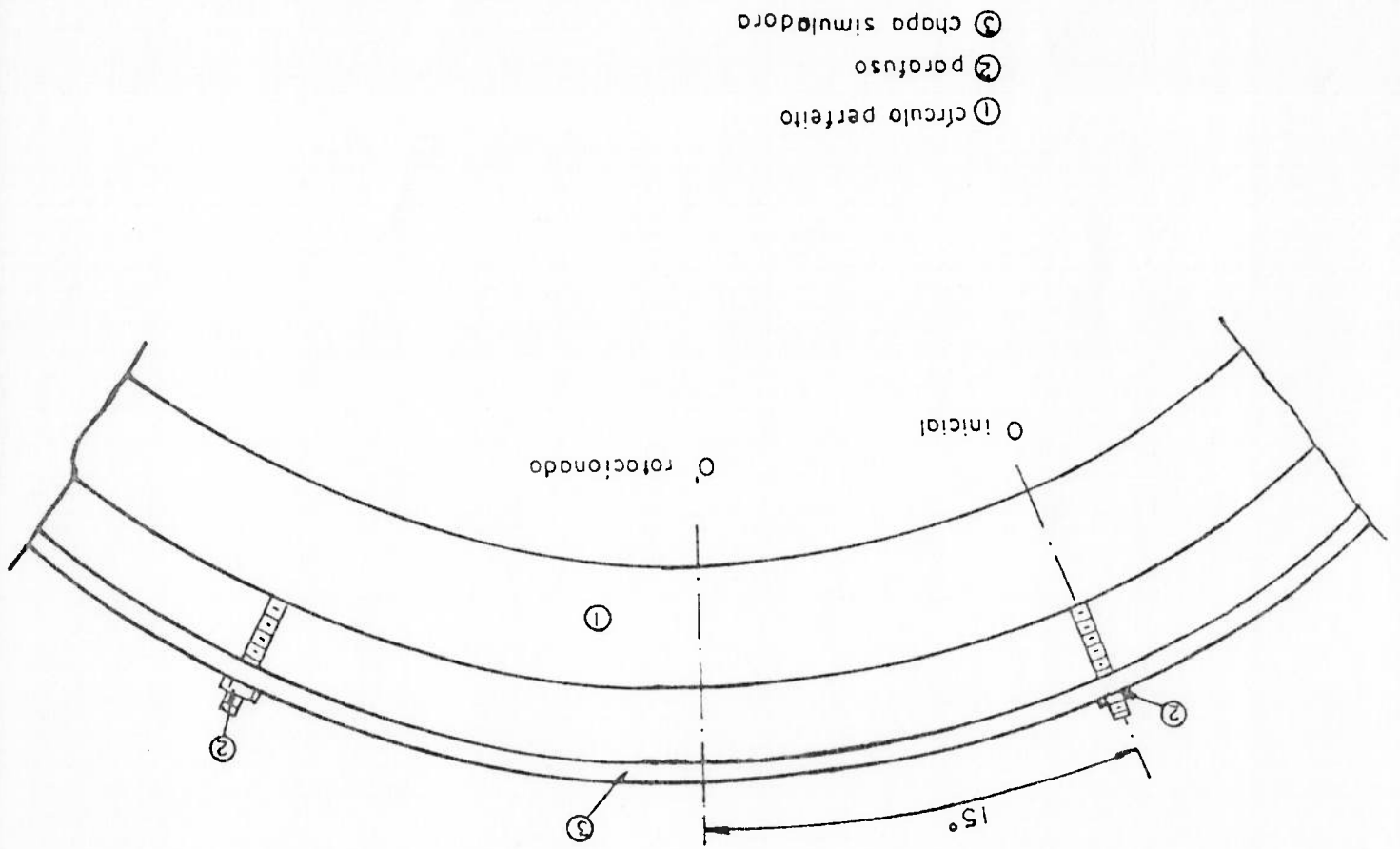


Figura 4.15 - Calço de madeira utilizado no vão da chapa simuladora do casco.



Figura 4.16 - Rotação do ponto inicial da marcação da régua em arco



Traduzando-se esse problema para a situação real, a medição de um casco de um submersível, principalmente quando o mesmo sofre reparos em um dique, que fornece pouca luminosidade na parte inferior do casco, nota-se a gritante necessidade de solucionar este problema.

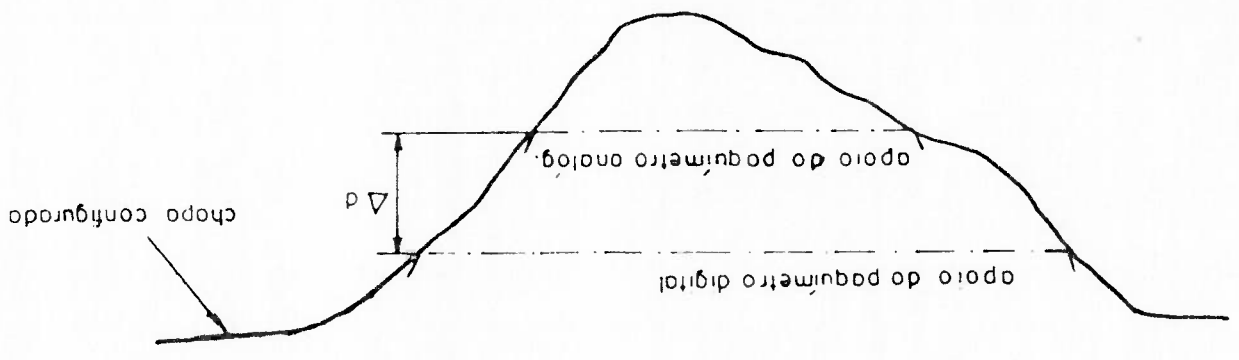
Visando diminuir este erro, e visando também a futura automatização do processo, surgiu a ideia da régua em arco digital, de leitura imediata, que facilitou, em muito, este trabalho.

#### IV.4.3.2 - DIGITAL

Como foi dito, a ideia da régua em arco digital nasceu da dificuldade de leitura com a régua em arco analógica, devido ao cansaço visual dos operadores. Porém, a área de apoio do paquímetro digital, na chapa simuladora do casco, é consideravelmente maior do que a área de apoio do paquímetro de profundidade analógica. Isto implica que, numa mesma estação, dependendo da configuração da mesma, pode-se ter uma leitura diferente para os dois paquímetros.

Na figura 4.17, tem-se uma ideia desse fato. Nota-se que o paquímetro analógico cai em um vale que o paquímetro digital ignora, alterando assim a medida.

Este problema não foi solucionado. Admite-se que esse erro é inerente ao próprio aparelho.



onde:  $\Delta d = d_{\text{digital}} - d_{\text{analógico}}$

OBS: s/ escala

Figura 4.17 - Comparação entre o apoio do paquímetro digital e do paquímetro analógico, na chapa simuladora do casco.

## RESULTADOS OBTIDOS

## CAPITULO V

## V.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são abordados os resultados obtidos, de posse dos valores da máxima falta de circularidade verdadeira imposta ao gabarito, e das máximas faltas de circularidade aparente obtidas com os já citados processos de medição. Para tanto, executou-se a abordagem estatística já descrita das amostras dos resultados, obtendo-se o intervalo de confiança, ou erro do processo, para um dado intervalo de probabilidade e de credibilidade, obtendo-se assim, os resultados apresentados a seguir, para cada um dos processos descritos.

## V.2 - COMPASSO

A partir dos resultados de máxima falta de circularidade, obtidos para as duas configurações  $C_1$  e  $C_2$ , tem-se as amostras dos valores aparentes das faltas de circularidade, conforme podem ser vistos nas tabelas IV.4 e IV.5 respectivamente. Com estas amostras, e com os valores verdadeiros das faltas de circularidade de cada uma das configurações, como podem ser vistos nas tabelas A.1 e A.2, e utilizando-se o tratamento estatístico descrito no item IV.2.1, pôde-se obter, para cada par de credibilidade  $C$  e probabilidade  $P$ , a amplitude do intervalo de confiança  $d_0$ , isto é:

"Com  $C$  de credibilidade a probabilidade da falta de circularidade verdadeira estar contida no intervalo  $[w_0 - d_0, w_0 + d_0]$ , é, no mínimo, igual a  $P$ ."

As tabelas V.1 e V.2, mostram a listagem dos resultados completos da relação entre  $C$ ,  $P$  e  $d_0$ , para as configurações  $C_1$  e  $C_2$ , respectivamente.



Tabela V.1 - Amostras das faltas de circularidade aparentes e

amplitudes  $\hat{d}_0$  do intervalo de confiança para cada

par credibilidade C e probabilidade P, para a

configuração C<sub>1</sub> imposta ao gabarito circular.

FORAM UTILIZADOS OS DADOS ABAIXO

6.10	6.20	6.30	6.30	6.30	6.30	6.30	6.30	6.30	6.40
6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50
6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.50	6.70
6.70	6.70	6.80	6.80	6.80	6.80	6.80	6.80	6.80	6.80

TABELA DAS AMPLITUDES DO INTERVALO DE CONFIANÇA PARA O VALOR = 5.90

C/P	91.00	92.00	93.00	94.00	95.00	96.00	97.00	98.00	99.00
91.00	0.80	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
92.00	0.80	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
93.00	0.80	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
94.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
95.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
96.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
97.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
98.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
99.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
100.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90





Analogamente ao que foi executado para o processo do compasso, obtve-se, a partir dos dados das tabelas B.3, B.5, B.7, B.9, IV.8 e IV.9, e utilizando-se o mesmo procedimento estatístico, pôde-se obter para cada par credibilidade C, e probabilidade P, dentro de um determinado intervalo, a amplitude do intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ .

Nas tabelas V.5 e V.6, pode-se verificar os resultados completos da relação entre C, P e  $\hat{d}_0$  para as configurações C<sup>1</sup> e C<sup>2</sup> respectivamente.

Na Tabela V.4 abaixo, estão resumidos os resultados obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , considerando 99% de credibilidade e 93% de probabilidade, análogo ao que foi executado no procedimento de qualificação de compasso.

Tabela V.4 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com P = 93% e C = 99%.

		$\hat{d}_0$		
		0,89	0,89	mm
		93 %	99 %	
		99 %	93 %	
		6,20	6,09	mm
		1 <sup>a</sup> configuração	2 <sup>a</sup> configuração	
		C <sup>1</sup>	C <sup>2</sup>	







A falta de circularidade de uma única secção pode ser descrita em uma série de senos e cossenos do tipo:

$$w = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos n\theta + D_n \sin n\theta \quad (V.12)$$

Foram obtidos também, neste processo de qualificação, através do programa ESCOAMEN, os termos dessa série para cada uma das 64 medições executadas em cada uma das configurações.

Atm de melhor analisar-se o desempenho do procedimento de medição, buscou-se utilizar o método estatístico descrito no item IV.2.1, de maneira análoga a utilizada para  $w_0$ , para a análise dos  $B_n^0$  e  $D_n^0$ , para a configuração  $C_1$ , e  $B_n^5$  e  $D_n^5$ , para a configuração  $C_2$ , e comparando-as com os respectivos valores obtidos nas tabelas B.4, B.6, B.8, B.9.

Nas Tabelas V.7 a V.10, pode-se verificar os resultados completos da relação entre  $C$ ,  $P$  e  $\hat{d}_0$ , para cada uma das componentes em seno e cosseno analisadas.

Na tabela V.11 abaixo, estão os resultados obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , considerando 98% de credibilidade e 93% de probabilidade, análogo aos procedimentos executados anteriormente.

Tabela V.11 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com  $P = 93\%$  e  $C = 99\%$ .

Valores verdadeiros			
	$C_1$	$C_2$	$\hat{d}_0$
B04	3,78	----	0,15
B05	----	3,46	0,63
D03	1,76	----	0,47
D04	----	1,49	0,51











Além desses valores, pode-se observar nas tabelas V.12 e V.13 os resultados completos da relação entre  $C$ ,  $P$  e  $\hat{d}_0$  para os valores de  $w'$ , que é a falta de circularidade, definida no item Definições, como sendo a falta de circularidade aparente descontadas as componentes que não correspondem a deformação do casco.

Na tabela V.14 abaixo, estão os resultados obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , considerando 99% de credibilidade e 93% de probabilidade, conforme os procedimentos anteriores.

Tabela V.14 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com  $P = 93\%$  e  $C = 99\%$ .

	$C_1$	$C_2$
	1ª configuração	2ª configuração
$w'$	7,01 mm	6,68 mm
$\hat{d}_0$	1,34 mm	1,33 mm

Disto tudo que foi visto, partindo do princípio de que  $C_2$  é uma configuração mais conservadora, pode-se dizer que ao determinar-se a falta de circularidade pelo processo do JIG, em configurações mais "convencionais", com o equipamento e os operadores qualificados pelo processo descrito no item IV.3.2, existe com 99% de credibilidade, um mínimo de 93% de probabilidade de se obter uma falta de circularidade no intervalo [ $w' \pm 0,88$ mm, onde  $w'$  é a falta de circularidade verdadeira da caverna analisada.

De maneira análoga, pode-se dizer que, nas condições acima mencionadas, existe com 99% de credibilidade um mínimo de 93% de probabilidade de se obter uma falta de circularidade no intervalo [ $w' \pm 1,33$ ], onde  $w'$  é a falta de circularidade verdadeira da caverna a ser analisada, descontadas as componentes que não correspondem à deformação do casco.







Análogamente ao que foi executado, podem utilizar-se os dados das tabelas IV.11 e C.3, obtive-se a tabela V.15, onde se verifica os resultados completos da relação entre  $C$ ,  $P$  e  $\hat{d}_0$  para a configuração  $C_1$ .

Na Tabela V.16 abaixo, estão resumidos os resultados obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , considerando 99% de credibilidade e 93% de probabilidade.

Tabela V.16 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com  $P = 93\%$  e  $C = 99\%$ .

$C_1$		$w_0$	6,75	mm
	$C$		99 %	
	$P$		93 %	
	$\hat{d}_0$		0,52	mm





Analogamente executou-se esta mesma análise, nas condições citadas anteriormente, para os termos  $B_0$ ,  $D_0$  e  $D_0^3$ , da série de Fourier e da falta de circularidade  $w'$ , como pode ser visto nas tabelas V.17, V.18 e V.19, onde são mostrados os resultados completos da relação entre  $C_1$ ,  $P$  e  $\hat{d}_0$ .

Na tabela V.20 abaixo, estão os resultados obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , considerando 99% de credibilidade e 93% de probabilidade, análogo aos procedimentos executados anteriormente.

Tabela V.20 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com  $P = 93\%$  e  $C = 99\%$ .

	$C_1$	$\hat{d}_0$
$B_0$	3,89	0,12
$D_0$	1,82	0,79
$w'$	7,61	0,93

Disto tudo que já foi descrito, partindo do princípio que  $C_1$  é uma configuração extremamente conservadora, pode-se dizer que ao determinar-se a falta de circularidade pelo método da régua em arco analógica, para configurações "conservadoras", com o equipamento e os operadores qualificados pelo processo descrito no item IV.3.3.1, existe com 99% de credibilidade, um mínimo de 93% de probabilidade de se obter uma falta de circularidade no intervalo  $[w_0 \pm 0,52]mm$ , onde  $w_0$  é a falta de circularidade verdadeira da caverna analisada.









De maneira análoga, pode-se dizer que, nas condições acima mencionadas, existe com 99 % de credibilidade um mínimo de 93 % de probabilidade de se obter uma falta de circularidade no intervalo  $[w' \pm 0,93]$ , onde  $w'$  é a falta de circularidade verdadeira da caverna a ser analisada, descontadas as componentes que não influem na deformação do casco.

## V.4.2 - DIGITAL

Analogamente ao que já foi executado, porém utilizando-se os dados das tabelas IV.13 e D.3, obtive-se a tabela V.16, onde se verifica os resultados completos da relação entre  $C$ ,  $P$  e  $\hat{d}_0$  para a configuração  $C_1$ .

Na tabela V.21, pode-se verificar os resultados completos da relação entre  $C$ ,  $P$  e  $\hat{d}_0$  para a configuração  $C_1$ .

Na Tabela V.22 abaixo, estão resumidos os resultados obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , considerando 99% de credibilidade e 93% de probabilidade, análogo ao que foi executado no procedimento de qualificação do compasso.

Tabela V.22 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com  $P = 93\%$  e  $C = 99\%$ .

$\hat{d}_0$	0,70 mm
P	93 %
C	99 %
$w_0$	6,68 mm
	$C_1$



Analogamente, para os termos  $B_0$  e  $D_0$ , como pode ser visto nas tabelas V.23, V.24 e V.25, onde são mostrados os resultados para cada uma das componentes em seno e cosseno analisadas, e da falta de circularidade  $w'$ .

Na tabela V.26 abaixo, estão os resultados obtidos para o as mesmas condições anteriormente utilizadas.

Tabela V.26 - Valores obtidos para o intervalo de confiança  $\hat{d}_0$ , com  $P = 93\%$  e  $C = 99\%$ .

	$C_1$	$\hat{d}_0$
$B_{04}$	3,87	0,15
$D_{03}$	1,84	0,68
$w'$	7,44	0,97

Disto tudo que já foi descrito, partindo do princípio que  $C_1$  é uma configuração extremamente conservadora, pode-se dizer que, ao determinar-se a falta de circularidade pelo método da régua em arco digital, para configurações "conservadoras", com o equipamento e os operadores qualificados pelo processo descrito no item IV.3.3.1, existe, com 99% de credibilidade, um mínimo de 93% de probabilidade de se obter uma falta de circularidade intervalo  $[w_0 \pm 0,70]mm$ , onde  $w_0$  é a falta de circularidade verdadeira da caverna analisada.









De maneira análoga, pode-se dizer que, nas condições acima mencionadas, existe, com 99 % de credibilidade, um mínimo de 93 % de probabilidade de se obter uma falta de circularidade no intervalo  $[w' \pm 0,97]$ , onde  $w'$  é a falta de circularidade verdadeira da caverna a ser analisada, descontadas as componentes que não correspondem à deformação do casco.

CAPITULO VI

CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DE UMA CAVERNA

VI.1 - INTRODUÇÃO

Tendo sido executada a medição da falta de circularidade de uma caverna do casco resistente de um submarino, e a consequente determinação do valor da mesma, deve-se avaliar o resultado da medição, decidindo-se, então, pelo cumprimento ou não do requisito de máxima falta de circularidade admissível para a caverna, adotado durante a execução do projeto do submarino.

BUELTA e FREITAS [21], fundamentaram um procedimento que possibilita esta avaliação, sendo que este pode ser aplicado para a análise de falta de circularidade de cavernas cujas medições foram executadas por qualquer um dos processos descritos no capítulo III, bastando para isso, que se execute duas medições de cada caverna a ser analisada. Este procedimento consiste em, baseado no valor dessas duas medições, no valor da amplitude do intervalo de confiança (erro do processo) e no valor da falta de circularidade admissível, determinar entre dez casos possíveis aquele em que se encaixam esses dados. A seguir são mostrados esses casos.

VI.2 - CASOS POSSÍVEIS PARA FALTA DE CIRCULARIDADE

A falta de circularidade determinada deve ser identificada segundo os casos A à D da tabela VI.1, a seguir:

TABELA VI.1 - Casos Possíveis para Falta de Circularidade Determinada

FALTA DE CIRCULARIDADE			
CASO A	CASO B	CASO C	CASO D
$w > (w^{ad} - d^o)$	$w > (w^{ad} + d^o)$	$(w^{ad} - d^o) \leq w \leq w^{ad}$	$w^{ad} < w \leq (w^{ad} + d^o)$

Onde:

$w_{ad} \dots$  é a falta de circularidade admissível,

determinada pelos requisitos do projeto do

caso resistente do submarino.

$d_o \dots$  é a amplitude do intervalo de confiança que

determina o erro do processo.

Uma vez identificado o caso em que se enquadrará a falta de circularidade obtida em cada uma das duas medições relacionadas para cada caverna, seguem-se os seguintes procedimentos:

CASO 1: A primeira e a segunda medição estão de acordo com o caso A.

Nesta situação considera-se que a falta de circularidade é menor que a falta de circularidade admissível.

CASO 2: Uma das medições está de acordo com o caso A e a outra medição está de acordo com caso B.

Nesta situação é necessária uma terceira medição. caso a terceira medição estiver conforme o caso A ou C, considera-se que a falta de circularidade é menor que a falta de circularidade admissível. Se a terceira medição estiver conforme o caso B ou D considera-se que a falta de circularidade é maior que a falta de circularidade admissível.

CASO 3: Uma das medições está de acordo com o caso A e outra medição está de acordo com o caso C.

Nesta situação considera-se que a falta de circularidade é menor que a falta de circularidade admissível.

CASO 4: Uma das medições está de acordo com o caso A e outra medição está de acordo com o caso D.  
Nesta situação considera-se que a falta de circularidade é menor que a falta de circularidade admissível.

CASO 5: A primeira e a segunda medição estão de acordo com o caso B.

Nesta situação considera-se que a falta de circularidade é maior que a falta de circularidade admissível.

CASO 6: Uma das medições está de acordo com o caso B e a outra medição de acordo com o caso C.

Nesta situação considera-se que a falta de circularidade é maior que a falta de circularidade admissível.

CASO 7: Uma das medições está de acordo com o caso B e outra medição está de acordo com o caso D.

Nesta situação considera-se que a falta de circularidade é maior que a falta de circularidade admissível.

CASO 8: A primeira e a segunda medição estão de acordo com o caso C.

Nesta situação considera-se que a falta de circularidade é menor que a falta de circularidade admissível.



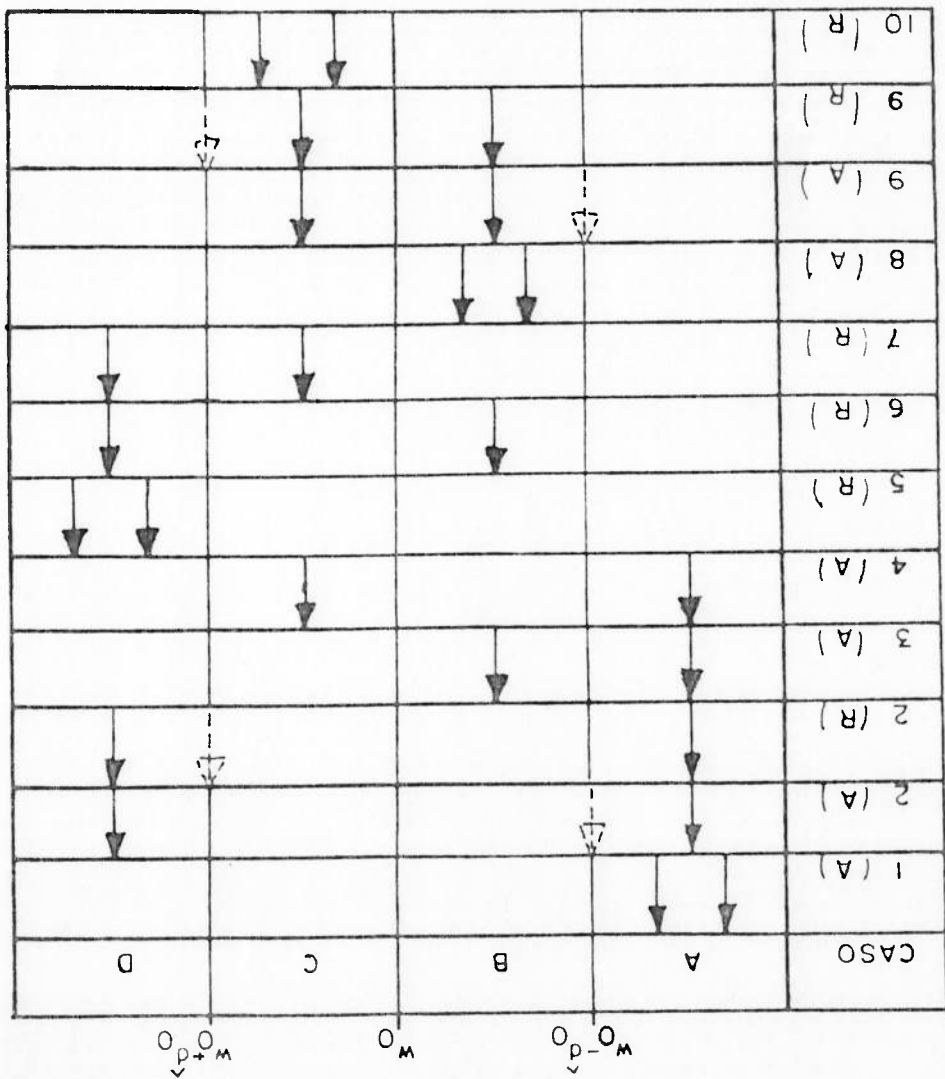
CASO 9: Uma medição está de acordo com o caso C e a outra medição está de acordo com o caso D.

Nesta situação é necessária uma terceira medição. caso a terceira medição estiver conforme o caso A ou C, considera-se que a falta de circularidade é menor que a falta de circularidade admitida. Se a terceira medição estiver conforme o caso B ou D, considera-se que a falta de circularidade é maior que a falta de circularidade admitida.

CASO 10: A primeira e a segunda medição estão de acordo com o caso D.

Nesta situação considera-se que a falta de circularidade é maior que a falta de circularidade admitida.

Os casos mencionados podem ser resumidos, em forma gráfica, na figura 6.1. A utilização deste procedimento de avaliação, permitirá, de forma segura, a aprovação ou rejeição de uma caverna de um submarino, indicando claramente, caso a caverna seja rejeitada, a necessidade de execução de uma análise estrutural mais detalhada da caverna, verificando por conseguinte, se existe a necessidade de redução da profundidade de operação do submarino. caso isto seja necessário, pode ser tomada a decisão da substituição da região da estrutura da qual faz parte a caverna defeituosa, resultando em graves implicações, quanto ao custo de fabricação.



(A) - aprovado  $w_{op} < w_{nd}$   
 (R) - reprovado  $w_{op} > w_{nd}$   
 ↓ - 1º 2º medição  
 ↓ - 3º medição

Figura 6.1 - Representação dos casos possíveis para falta de circularidade determinada

## CAPITULO VII

## CONCLUSÕES

## VII.1 - EXPLANAÇÕES FINAIS

Ao término deste trabalho pode-se dizer que se conseguiu conhecer a fundo, o que os processos de medição de falta de circularidade de submersíveis podem, efetivamente, fornecer. Esse conhecimento tem importância fundamental, dentro da nossa realidade e dos empreendimentos que, principalmente, a Marinha do Brasil está levando a cabo, com a fabricação dos submarinos IRL-1400 e projetos de novos submarinos nacionais. Além do mais, foi desenvolvido um novo processo de medição, o processo da régua em arco digital. Este processo ao que se sabe é inédito a nível de América Latina, e possivelmente a nível mundial também, tendo-se revelado o mais prático, rápido e recomendável entre os estudados.

Os métodos utilizados para a qualificação dos processos e dos operadores também são inéditos, mostrando-se altamente confiáveis e de grande aplicabilidade, não só para processos de medição de falta de circularidade, como para outros processos de medição. O critério de aceitação de uma caverna, que foi desenvolvido, pode ser considerado um critério rigoroso, porém, face ao alto risco envolvido, tanto material com em vidas humanas, não convém aplicar critérios mais flexíveis.

Finalmente, pode-se dizer, que este trabalho deve-se constituir em uma fonte de consulta em nível didático ou profissional. Ao longo deste trabalho, está mostrado o atual estado da arte, a nível nacional, do controle de falta de circularidade de submersíveis. E a partir deste, que se devem tomar os próximos passos, em vista à continuidade destes estudos, e ao avanço tecnológico nessa área.

A partir de tudo que foi dito, pode-se concluir que, para cada um dos processos de medição qualificados; tendo em vista a configuração imposta ao gabarito, que sem dúvida é bastante conservadora, haja visto seu alto número de ondas circunferenciais, existe com 99% de credibilidade, um mínimo de 93% de probabilidade de obter-se uma máxima falta de circularidade dentro dos intervalos indicados a seguir:

PROCESSO DE MEDIÇÃO	COMPASSO	JIG	RÉGUA EM ARCO ANALÓGICA	RÉGUA EM ARCO DIGITAL
INTERVALO DE CONFIANÇA	$W^{\circ} \pm 1,03$	$W^{\circ} \pm 0,89$	$W^{\circ} \pm 0,52$	$W^{\circ} \pm 0,70$
	mm	mm	mm	mm

Tendo em vista que os valores de falta de circularidade admissíveis para o submarino, cuja dimensões serviram de base para a execução deste trabalho, são da ordem de 5 a 10 mm, dependendo da etapa de fabricação, os valores da amplitude do intervalo giram entre 5% e 10% do valor da falta de circularidade admissível, o que denota uma boa precisão dos processos, considerando-se as condições de execução da medição. Para os três processos estudados, podemos concluir também que em função da configuração imposta ao gabarito, as amplitudes dos intervalos de confiança obtidos para a máxima falta de circularidade verdadeira, são bastante conservadoras. Tendo isso em vista, podemos concluir que o processo da régua em arco supera com algumas vantagens os outros processos. O processo de medição de falta de circularidade de cavernas de submarinos com o auxílio da régua em arco tem a vantagem de ser rápido e de fácil utilização, podendo ser usado em todas as fases de fabricação e de operação do submarino, não se

restringindo, como os processos do compasso e do "jig", a ser usado somente em fases iniciais da fabricação. Essa sua rápida e fácil utilização faz com que as medições, para uma mesma secção, possam ser efetuadas várias vezes ao longo da fabricação, propiciando o conhecimento da influência das várias etapas dessa fabricação nas imperfeições que vão sendo obtidas.

Dessa forma, a própria fabricação pode ser controlada e os processos de fabricação melhorados.

A busca de uma qualidade aceitável para o processo da régua em arco é fundamental para garantir a precisão dos resultados de medição de falta de circularidade das caverνας, bem como permitir a real melhoria dos processos de fabricação, atualmente utilizados para o casco resistente.

O desenvolvimento da régua em arco digital representa uma resposta adequada à busca de uma qualidade aceitável para o processo da régua em arco pois comparando-se esta régua digital com a régua analógica, verifica-se que a régua digital facilita significativamente a leitura dos off-sets nas diversas estações de medição ao longo da circunferência de uma caverņa, reduzindo a possibilidade de erro de leitura por parte do operador, que comprometeria a qualidade da medição.

Além disso, a medição de falta de circularidade com a régua em arco digital é significativamente mais rápida do que a medição com a régua em arco analógica, apesar de um intervalo de confiança ligeiramente maior, de 0,70 contra 0,52, isto devido ao contato do paquímetro digital com a chapa simuladora do casco ser maior do que a do paquímetro analógico. Esse aumento na velocidade de medição é bastante benéfico, pois reduz o tempo necessário para a execução do controle de qualidade da falta de circularidade. Isto é importante, tendo em vista que durante o procedimento de medição de falta de circularidade, nenhuma obra pode ser executada na região que é objeto da medição. Há uma parada geral da produção e portanto, a redução do tempo de medição implica em uma retomada mais rápida do processo de produção, reduzindo, assim, o tempo de fabricação do casco resistente.



Deve-se ressaltar, também, que foi elaborado um procedimento de avaliação de falta de circularidade de cavernas de submarinos, que permite, após a determinação da falta de circularidade de uma caverna, uma precisa avaliação do cumprimento dos requisitos de projeto quanto à máxima falta de circularidade admissível, isto é, permite definir, seguramente, se a falta de circularidade da caverna é superior ou inferior à falta de circularidade admissível obtida no projeto. Esta avaliação, é de fundamental importância, pois, o não atendimento dos requisitos de falta de circularidade por parte de uma caverna, pode implicar em substituição de uma grande porção estrutural do casco resistente, com sérios prejuízos para a obra. Dessa forma a metodologia de análise de falta de circularidade, ora proposta, pode reduzir, significativamente, a possibilidade de erro de avaliação dos resultados de medição de uma caverna, reduzindo a possibilidade de substituição de uma porção de estrutural do casco resistente, devido à uma avaliação incorreta da falta de circularidade, e reduzindo também a possibilidade de aceitação de uma porção estrutural do casco com falta de circularidade acima da admissível, o que reduziria a cota de operação do submarino, na melhor hipótese.

Adicionalmente, tendo em vista os resultados de precisão do processo, com a utilização do procedimento de cálculo da máxima falta de circularidade proposto por BUELTA e FRANTZA [10], ao invés do procedimento tradicionalmente utilizado pelo San Francisco Naval Shipyard, verifica-se que o erro da Régua em Arco é muito pequeno quando comparado com os valores admissíveis para a máxima falta de circularidade. Isto torna o processo muito confiável, sendo sua utilização plenamente aceitável, ao longo de toda a fabricação e da vida útil do submarino.

Deve-se ainda ressaltar que a precisão do processo da régua em arco digital é, inclusive, superior aos outros processos de medição de falta de circularidade utilizados atualmente pela Marinha do Brasil, conforme indicado nas tabelas V.3, V.4, V.20 e V.22 reforçando mais uma vez, a superioridade da régua em arco sobre os demais processos.

Desse modo, o processo da régua em arco pode ser considerado preciso e seguro, podendo seus resultados serem utilizados com total confiança na avaliação da máxima falta de circularidade do casco, evitando, em alguns casos, que, por desconhecimento, proceda-se à redução da profundidade de operação do submarino ou à substituição de uma régua relativamente extensa do casco, com óbvias e sérias implicações.

Finalmente, o processo da régua em arco pode, ainda, ser utilizado, com segurança, por usuários de submarinos de pesquisa e inspeção, ou na medição de falta de circularidade em qualquer outra estrutura, de forma rápida e precisa tais como: vasos de pressão de modo geral, contenedores de usinas nucleares ou pernas cilíndricas de plataformas de produção ou prospecção de petróleo.

### VII.3 - TRABALHOS FUTUROS

Resta ainda no campo da avaliação da falta de circularidade alguns itens que devem ser ressaltados para a execução futura:

- Construção de uma régua em arco para submarinos de grande diâmetro. Há visto que o submarino utilizado como base deste estudo possui aproximadamente 6,5 m de diâmetro, sendo considerado de dimensões medianas, deve-se estudar a construção de uma régua para submarinos de diâmetro entre 8 ou 9 metros.

- Aprimoramentos na régua em arco digital. Deve-se solucionar uma dificuldade verificada durante a qualificação, que são os erros que ainda advêm da anotação manual dos valores dos off-sets medidos. Uma solução para esta dificuldade seria o uso de um registrador adaptado ao paquímetro digital. Esse registrador imprimiria os valores obtidos, automatizando mais ainda o processo.

- Pode-se ainda estudar a implantação de um sensor apalpador em lugar do paquímetro. Esse sensor seria conectado a um microcomputador, ou uma unidade de registro de dados, aumentando a sensibilidade do processo.

- Deve-se corrigir o erro no contato da régua digital com o casco. Esse contato, conforme descrito no capítulo IV.4.3.2, é feito pela cabeça do paquímetro. Um modo possível de diminuir esse erro é a instalação de um calço em forma de cunha, que reduziria sensivelmente a área de contato.
- Pode-se ainda, partindo do aprimoramento dos processos qualificados neste trabalho, chegar em processos mais rápidos e precisos que muito viriam a contribuir para o aprimoramento tecnológico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [11] - COMSTOCK, John P. - "Principles of Naval Architecture"; SNAME; New York
- [12] - DDS 9910-8 - "Submarine Structural Design. Design Data Sheet"; Department of the Navy; Bureau of Ships; Washington. (1965).
- [13] - BV-1041-2 - "Submarines. Construction Regulation for Ships of the German Navy". (1975).
- [14] - BUELTA, M.A.M. - "Projeto, Análise e Ensaio de Estruturas de Submersíveis"; CEPEN/USP. (1984)
- [15] - KENDRICK, S. - "The Deformation Under External Pressure of Nearly Cylindrical Shell With Evenly Spaced Equal Strength Nearly Circular Ring Frames"; NCRE, Report n<sup>o</sup> R259, NCRE, St. Leonard Hill, Dunfermline, Fife. (1953).
- [16] - VON SANDEN, K. & GUNTHER, K. - "The Strength of Cylindrical Shells, Stiffened by Frames and Bulkheads, under Uniform External Pressure on All Sides"; DTMB, Report T-38. (1952).
- [17] - BUELTA, M.A.M. e MAURÍCIO, S.C. - "Manual de Engenharia do Programa CIRSUBTR"; CEPEN/USP. (1988).

[8] - JUE, L.S. - "Calculating the Circularity of a Submarine Pressure Hull by the Bridge Gauge Transverse Method"; Technical Report Nº 1362-62; San Francisco Naval Shipyard. (1964).

[9] - BUELTA, M.A.M. - "Qualificação do Processo da Régua em Arco para uma Configuração do Gabarito AMR1"; CEPEN/USP. (1988).

[10] - BUELTA, M.A.M. e FRANTZA, S. - "Reunião Técnica sobre Projeto de Estruturas de Submarinos"; Lubeck, Alemanha. (1990).

[11] - AIGNER, D.J. - "Basic Econometrics"; New York; EVA; Prentice - Hall. (1971).

[12] - BUELTA, M.A.M., SOUZA, G.F.M e MASSAROTTI, V.M. - "Manual de Engenharia do Programa CIRSUBRO"; CEPEN/USP. (1990).

[13] - BUELTA, M.A.M. e FREITAS, D.P.S. - "Fundamentos de Probabilidade a serem Usados na Qualificação Preliminar do Processo da Régua em Arco para Medição de Falta de Circularidade"; CEPEN/USP. (1988).

[14] - BUELTA, M.A.M., MAURÍCIO, S.C., - "Manual de Engenharia do Programa AMPLIT"; CEPEN/USP. (1988).



- [15] - BUELTA, M.A.M. e FREITAS, D.P.S. - "Fundamentos de Probabilidade a serem Usados na Seleção de Operadores para medição da Falta de Circularidade em Cavernas de Submarinos"; CENO/USP. (1989).
- [16] - BUELTA, M.A.M., FREITAS, D.P.S., - "Fundamentos de Probabilidade a serem usados na Qualificação Preliminar do Processo da Régua em Arco para medição de Falta de Circularidade"; CEPEN/USP (1988).
- [17] - BUELTA, M.A.M., CALIXTO A.S.F., - "Manual de Engenharia do Programa ESCOAMEN"; CEPEN/USP. (1988).
- [18] - BUELTA, M.A.M., CALIXTO, A.S.F., - "Manual de Engenharia do Programa DRAWKL"; CEPEN/USP. (1988).
- [19] - BUELTA, M.A.M., SOUZA, G.F.M. e MASSAROTTI, V.M. - "Qualificação do Processo da Régua em Arco Digital para uma Configuração Imposta ao Gabarito NUCLEP; CENO/USP. (1990).
- [20] - BUELTA, M.A.M., SOUZA, G.F.M. e MASSAROTTI, V.M. - "Qualificação do Processo da Régua em Arco para uma Configuração Imposta ao Gabarito NUCLEP; CENO/USP. (1990).
- [21] - BUELTA, M.A.M., FREITAS, D.P.S. - "Fundamentos de Probabilísticos das Normas Técnicas para Medição e Avaliação da Falta de Circularidade em Cavernas de Submarinos"; CENO/USP (1990).

- [22] - BUELTA, M.A.M., e FERES, A. - "Qualificação do Processo do Compasso para Duas Configurações Impostas ao Gabarito NUCLEP"; CEPEN/USP. (1988).
- [23] - BUELTA, M.A.M., SOUZA, G.F.M. e MORANDI, A.C. - "Qualificação do Processo do "JIG" para Duas Configurações Impostas ao Gabarito NUCLEP"; CENO/USP. (1990).
- [24] - BUELTA, M.A.M., SOUZA, G.F.M. - "Avaliação de Falta de Circularidade de Cavernas de Submarinos pelo Processo da Régua em Arco". 13º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval, (1990).
- [25] - KENDRICK, S. - "The Buckling Under External Pressure of Circular Cylindrical Shells with Evenly Spaced Equal Strength Circular Frames", Part I, Report nº R211, Part II, Report nº R243, Part III, Report nº R244, Part IV, Report nº R372, NCRE, St. Leonard Hill, Dunfermline, Fife. (1953).
- [26] - KENDRICK, S. - "Externally Pressurized Vessels. In: The Stress Analysis of Pressure Vessels and Pressure Vessel Components"; New York, Pergamon Press. (1970)
- [27] - BRYANT, A.R. - "Hydrostatic Pressure Buckling of a Ring-Strengthened Tube"; NCRE, Report nº R306. (1954).
- [28] - BUELTA, M.A.M., CALIXTO, A.S.F., - "Cálculo de Profundidade de Escoramento de Cavernas de Submarinos"; SOBENA. (1988).

PROCESSAMENTO DOS DADOS DE FALTA DE CIRCULARIDADE DO  
PROCESSO DE QUALIFICAÇÃO DO COMPASSO

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Resultados obtidos pelo processamento do programa CIRSUDO para os dados da tabela IV.2.

PTO	RAIO	DESVIO
0	3104.77	5.20
1	3105.18	5.61
2	3105.47	5.90
3	3104.33	4.76
4	3102.21	2.64
5	3102.18	2.60
6	3100.92	1.35
7	3099.52	-0.05
8	3098.35	-1.23
9	3098.34	-1.23
10	3097.17	-2.41
11	3097.56	-2.01
12	3098.83	-0.74
13	3100.37	0.80
14	3100.90	1.33
15	3101.27	1.70
16	3101.62	2.05
17	3101.81	2.24
18	3102.49	2.92
19	3101.80	2.23
20	3101.49	1.92
21	3100.87	1.30
22	3100.02	0.45
23	3099.10	-0.47
24	3098.00	-1.57
25	3097.58	-2.00
26	3098.12	-1.45
27	3097.22	-2.35
28	3098.04	-1.53
29	3098.07	-1.50
30	3099.56	-0.01
31	3100.99	1.42
32	3102.08	2.51
33	3102.76	3.19
34	3102.59	3.01
35	3102.15	2.58
36	3103.20	3.63
37	3103.48	3.91
38	3102.44	2.87
39	3099.68	0.11
40	3096.70	-2.87
41	3095.59	-3.98
42	3095.10	-4.48
43	3095.32	-4.25
44	3094.96	-4.61
45	3093.67	-5.90
46	3096.89	-2.68
47	3097.93	-1.64
48	3097.13	-2.45

PTO

RAIO

DESVIO

49	3100.49	0.91
50	3101.61	2.04
51	3102.74	3.17
52	3102.94	3.37
53	3105.10	5.53
54	3105.47	5.90
55	3103.71	4.14
56	3104.07	4.50
57	3103.15	3.57
58	3099.89	0.32
59	3098.87	-0.71
60	3097.91	-1.66
61	3096.24	-3.33
62	3094.55	-5.02
63	3094.79	-4.78
64	3093.67	-5.90
65	3093.84	-5.73
66	3096.41	-3.16
67	3098.82	-0.75
68	3100.04	0.47
69	3101.21	1.63
70	3101.68	2.11
71	3103.37	3.80

MAX =

5.90 =

RAIO MEDIO DA SECCAO = 3099.95

RAIO PARA OTIMIZACAO = 3099.57

CENTRO DE REFERENCIA : CENTRO GEOM. DOS 72 PONTOS NA CAVERNA

COORDENADAS DO CENTRO : ( X = 4.49 Y = 2.22 )



Tabela A.2 - Resultados obtidos pelo processamento do programa ESCOAMEN para os dados da tabela IV.2.

PI 1/2

DECOMPOSICAO EM SERIE DE FOURIER

$$W = B \cdot \cos(N \cdot \text{TEIAD}) + D \cdot \sin(N \cdot \text{TEIAD})$$

N =	B =	D =
0	0.38	0.00
1	0.49	0.48
2	0.02	0.26
3	0.37	1.85
4	3.78	-0.17
5	0.06	0.11
6	0.20	-0.01
7	-0.24	-0.02
8	-0.04	0.11
9	-0.11	-0.18
10	-0.03	0.18

ANGULO FALTA DE CIRCULARIDADE W - B0 - B1 COS(TEIAD) - D1 SEN(TEIAD)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0	95.0	100.0	105.0	110.0	115.0	120.0	125.0	130.0	135.0
4.33	4.71	4.96	3.78	1.64	1.58	0.31	-1.10	-2.28	-2.29	-3.46	-3.06	-1.77	-0.22	0.34	0.73	1.12	1.35	2.06	1.42	1.16	0.58	-0.21	-1.08	-2.12	-2.49	-1.89	-2.72

FALTA DE CIRCULARIDADE W -BO-B1COS(THETA)-D1SENCTHETA

VALOR MAXIMO DOS W. (S) = 6.34

29	140.0	-1.84
30	145.0	-1.75
31	150.0	-0.21
32	155.0	1.28
33	160.0	2.42
34	165.0	3.16
35	170.0	3.03
36	175.0	2.64
37	180.0	3.74
38	185.0	4.06
39	190.0	3.06
40	195.0	0.33
41	200.0	-2.63
42	205.0	-3.72
43	210.0	-4.19
44	215.0	-3.95
45	220.0	-4.30
46	225.0	-5.59
47	230.0	-2.38
48	235.0	-1.35
49	240.0	-2.17
50	245.0	1.18
51	250.0	2.27
52	255.0	3.38
53	260.0	3.54
54	265.0	5.67
55	270.0	6.00
56	275.0	4.19
57	280.0	4.50
58	285.0	3.53
59	290.0	0.23
60	295.0	-0.86
61	300.0	-1.87
62	305.0	-3.60
63	310.0	-5.35
64	315.0	-5.16
65	320.0	-6.34
66	325.0	-6.23
67	330.0	-3.72
68	335.0	-1.37
69	340.0	-0.21
70	345.0	0.91
71	350.0	1.33
72	355.0	2.97

ANGULO

Tabela A.3 - Resultados obtidos pelo processamento do programa CIRSUBDO para os dados da tabela IV.3.

PI 1/2

PTO	RATIO	DESVIO
0	3104.36	5.54
1	3104.47	5.65
2	3104.50	5.67
3	3103.43	4.60
4	3101.68	2.86
5	3101.26	2.44
6	3099.18	0.35
7	3097.92	-0.90
8	3097.50	-1.33
9	3098.26	-0.56
10	3098.41	-0.42
11	3099.89	1.06
12	3101.50	2.68
13	3103.45	4.63
14	3103.94	5.11
15	3103.41	4.58
16	3102.46	3.64
17	3101.44	2.62
18	3101.21	2.38
19	3099.80	0.98
20	3099.17	0.35
21	3098.97	0.14
22	3099.48	0.66
23	3100.22	1.39
24	3100.62	1.80
25	3101.74	2.92
26	3103.88	5.05
27	3103.42	4.59
28	3103.31	4.49
29	3102.06	3.24
30	3101.96	3.14
31	3100.86	2.04
32	3098.50	-0.32
33	3097.14	-1.69
34	3097.06	-1.77
35	3095.91	-2.91
36	3095.60	-3.22
37	3096.37	-2.46
38	3098.67	-0.16
39	3100.04	1.21
40	3100.58	1.76
41	3103.00	4.17
42	3104.23	5.41
43	3103.94	5.11
44	3103.06	4.24
45	3101.65	2.82
46	3102.65	3.83
47	3099.42	0.60

PTO 71  
70  
69  
68  
67  
66  
65  
64  
63  
62  
61  
60  
59  
58  
57  
56  
55  
54  
53  
52  
51  
50  
49  
48

RAIO 3102.95  
3100.61  
3099.38  
3097.56  
3096.30  
3094.55  
3093.15  
3094.10  
3096.55  
3097.79  
3100.72  
3102.89  
3103.09  
3102.63  
3104.50  
3103.34  
3099.76  
3098.75  
3096.97  
3093.70  
3093.15  
3093.72  
3093.36  
3094.96

DESVIO 4.13  
1.78  
0.55  
-1.26  
-2.52  
-4.27  
-5.67  
-4.72  
-2.28  
-1.04  
1.90  
4.07  
4.27  
3.81  
5.67  
4.52  
0.94  
-0.07  
-1.86  
-5.12  
-5.67  
-5.10  
-5.47  
-3.87

MAX W = 5.67  
RAIO MEDIO DA SECCAO = 3099.94  
RAIO PARA OTIMIZACAO = 3098.83  
CENTRO DE REFERENCIA : CENTRO GEOM. DOS 72 PONTOS NA CAVERNA  
COORDENADAS DO CENTRO : ( X = 3.77 Y = 2.62 )

Tabela A.4 - Resultados obtidos pelo processamento do programa ESCOAMEN para os dados da tabela IV.3.

f1 1/2

DECOMPOSICAO EM SERIE DE FOURIER

W = B. COSCN. TETAD + D. SENCN. TETAD

N =	B =	D =
0	1.12	0.00
1	0.16	1.27
2	0.03	0.20
3	0.28	-0.02
4	-0.08	1.78
5	3.86	0.10
6	0.24	-0.07
7	-0.27	0.16
8	-0.04	0.01
9	-0.09	-0.20
10	-0.18	-0.01

ANGULO

FALTA DE CIRCULARIDADE  
W - B0-B1 COSC THETA - D1 SEN C THETA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0	95.0	100.0	105.0	110.0	115.0	120.0	125.0	130.0	135.0
4.26	4.26	4.18	3.00	1.15	0.64	-1.64	-2.88	-3.39	-2.70	-2.62	-1.19	0.38	2.29	2.74	2.19	1.23	0.21	-0.01	-1.40	-2.00	-2.17	-1.61	-0.82	-0.35	0.84	3.05	2.68



FALTA DE CIRCULARIDADE W -BO-B1 COSC(THETA)-D1 SENC(THETA)

VALOR MAXIMO DOS W. (CS) = 6.19

ANGULO	VALOR
29	140.0
30	145.0
31	150.0
32	155.0
33	160.0
34	165.0
35	170.0
36	175.0
37	180.0
38	185.0
39	190.0
40	195.0
41	200.0
42	205.0
43	210.0
44	215.0
45	220.0
46	225.0
47	230.0
48	235.0
49	240.0
50	245.0
51	250.0
52	255.0
53	260.0
54	265.0
55	270.0
56	275.0
57	280.0
58	285.0
59	290.0
60	295.0
61	300.0
62	305.0
63	310.0
64	315.0
65	320.0
66	325.0
67	330.0
68	335.0
69	340.0
70	345.0
71	350.0
72	355.0

2.67
1.51
1.52
0.52
-1.73
-2.99
-2.96
-3.99
-4.19
-3.31
-0.91
0.57
1.22
3.73
5.06
4.85
4.05
2.71
3.78
0.61
-3.81
-5.37
-4.97
-5.52
-4.96
-1.70
0.08
1.07
4.62
5.74
3.83
4.24
3.97
1.73
-1.28
-2.61
-5.14
-6.19
-4.89
-3.24
-2.09
-0.39
0.73
2.96

PROCESSAMENTO DOS DADOS DE FALTA DE CIRCULARIDADE DO  
PROCESSO DE QUALIFICAÇÃO DO JIG

APÊNDICE B

Tabela B.1 - Resultados obtidos do raio e dos desvios radiais da primeira medição de raios do círculo de referência.

PTO	RAIO	DESVIO
0	2951.46	-0.04
1	2951.53	0.03
2	2951.50	0.00
3	2951.51	0.01
4	2951.54	0.05
5	2951.54	0.04
6	2951.56	0.06
7	2951.56	0.06
8	2951.53	0.03
9	2951.55	0.05
10	2951.57	0.07
11	2951.58	0.08
12	2951.59	0.09
13	2951.60	0.10
14	2951.61	0.11
15	2951.56	0.06
16	2951.54	0.04
17	2951.53	0.03
18	2951.51	0.01
19	2951.52	0.03
20	2951.50	0.01
21	2951.52	0.02
22	2951.59	0.09
23	2951.58	0.08
24	2951.58	0.09
25	2951.59	0.09
26	2951.55	0.05
27	2951.55	0.05
28	2951.52	0.03
29	2951.51	0.01
30	2951.49	-0.01
31	2951.46	-0.04
32	2951.43	-0.06
33	2951.39	-0.11
34	2951.39	-0.11
35	2951.40	-0.10
36	2951.38	-0.11
37	2951.39	-0.11
38	2951.39	-0.11
39	2951.41	-0.09
40	2951.42	-0.08
41	2951.43	-0.06
42	2951.47	-0.02
43	2951.49	-0.00
44	2951.49	-0.01
45	2951.53	0.03

PTO

RAIO

DESVIO

46	2951.56	0.06
47	2951.58	0.08
48	2951.61	0.11
49	2951.61	0.11
50	2951.60	0.10
51	2951.58	0.08
52	2951.58	0.08
53	2951.55	0.06
54	2951.56	0.07
55	2951.54	0.04
56	2951.53	0.03
57	2951.52	0.02
58	2951.54	0.04
59	2951.53	0.04
60	2951.53	0.03
61	2951.54	0.04
62	2951.49	-0.01
63	2951.50	0.01
64	2951.49	-0.01
65	2951.46	-0.04
66	2951.45	-0.05
67	2951.41	-0.08
68	2951.39	-0.11
69	2951.39	-0.11
70	2951.41	-0.09
71	2951.43	-0.06

MAX W

= 0.11 mm

RAIO MEDIO DA SECCAO = 2951.51

RAIO PARA OTIMIZACAO = 2951.50

CENTRO DE REFERENCIA : CENTRO GEOM. DOS 72 PONTOS NA CAVERNA

COORDENADAS DO CENTRO : ( X = -0.03 Y = -0.01 )

Tabela B.2 - Resultados obtidos do raio e dos desvios radiais da segunda medição de raios do círculo de referência.

f1 1/2

PTO	RAIO	DESVIO
0	2951.44	-0.11
1	2951.46	-0.09
2	2951.51	-0.04
3	2951.52	-0.03
4	2951.55	-0.00
5	2951.57	0.02
6	2951.57	0.03
7	2951.58	0.03
8	2951.60	0.05
9	2951.61	0.06
10	2951.65	0.10
11	2951.65	0.10
12	2951.65	0.10
13	2951.66	0.11
14	2951.65	0.10
15	2951.64	0.09
16	2951.62	0.07
17	2951.61	0.06
18	2951.60	0.05
19	2951.60	0.05
20	2951.61	0.07
21	2951.61	0.06
22	2951.63	0.08
23	2951.65	0.10
24	2951.65	0.10
25	2951.65	0.10
26	2951.62	0.07
27	2951.60	0.05
28	2951.58	0.04
29	2951.56	0.01
30	2951.53	-0.01
31	2951.51	-0.04
32	2951.48	-0.07
33	2951.47	-0.08
34	2951.45	-0.10
35	2951.45	-0.10
36	2951.45	-0.10
37	2951.44	-0.11
38	2951.44	-0.11
39	2951.44	-0.11
40	2951.45	-0.10
41	2951.47	-0.08
42	2951.49	-0.06
43	2951.51	-0.04
44	2951.53	-0.02
45	2951.56	0.01



MAX w = 0.11 mm  
 RAO MEDIO DA SECCAO = 2951.57  
 RAO PARA OTIMIZACAO = 2951.55  
 CENTRO DE REFERENCIA : CENTRO GEOM. DOS 72 PONTOS NA CAVERNA  
 COORDENADAS DO CENTRO : ( X = -0.06 Y = -0.02 )

PTO	RAIO	DESVIO
46	2951.58	0.03
47	2951.60	0.05
48	2951.62	0.07
49	2951.65	0.10
50	2951.66	0.11
51	2951.66	0.11
52	2951.66	0.11
53	2951.65	0.10
54	2951.64	0.09
55	2951.64	0.09
56	2951.65	0.10
57	2951.64	0.09
58	2951.64	0.09
59	2951.63	0.09
60	2951.63	0.08
61	2951.61	0.06
62	2951.61	0.06
63	2951.58	0.03
64	2951.57	0.02
65	2951.55	0.00
66	2951.51	-0.04
67	2951.50	-0.05
68	2951.47	-0.08
69	2951.48	-0.07
70	2951.48	-0.07
71	2951.49	-0.06

Tabela B.3 - Processamento do programa CIRSUBDO para os valores dos off-sets totais para a configuração C<sub>1</sub> (primária medição dos raios).

f1 1/2

PTO	RAIO	DESVIO
0	3006.11	5.33
1	3006.95	6.17
2	3006.91	6.13
3	3006.28	5.51
4	3004.95	4.18
5	3004.42	3.65
6	3003.19	2.41
7	3002.46	1.69
8	3001.73	0.96
9	3001.13	0.36
10	3000.17	-0.61
11	3000.72	-0.06
12	3001.95	1.17
13	3003.60	2.83
14	3003.69	2.92
15	3004.74	3.97
16	3005.75	4.98
17	3005.74	4.97
18	3006.10	5.33
19	3005.37	4.59
20	3005.26	4.49
21	3004.46	3.68
22	3003.52	2.75
23	3001.92	1.15
24	3001.75	0.98
25	3002.29	1.52
26	3002.68	1.90
27	3000.51	-0.26
28	3000.83	0.05
29	3000.89	0.12
30	3002.70	1.93
31	3004.35	3.57
32	3004.99	4.21
33	3005.39	4.62
34	3006.58	5.80
35	3006.96	6.18
36	3005.45	4.67
37	3005.24	4.46
38	3003.73	2.96
39	3001.49	0.71
40	2999.16	-1.62
41	2997.56	-3.22
42	2996.35	-4.42
43	2996.95	-3.83
44	2996.75	-4.03
45	2994.60	-6.18

PTO	RAIO	DESVIO
46	2996.96	-3.81
47	2997.79	-2.98
48	2997.80	-2.97
49	3000.51	-0.27
50	3003.32	2.54
51	3003.05	2.27
52	3003.67	2.89
53	3005.25	4.47
54	3005.58	4.81
55	3006.96	6.18
56	3006.28	5.51
57	3003.14	2.36
58	3003.21	2.44
59	3001.80	1.03
60	2998.12	-2.65
61	2999.45	-1.32
62	2997.67	-3.11
63	2994.89	-5.88
64	2994.59	-6.18
65	2998.13	-2.65
66	2997.04	-3.74
67	3001.94	1.16
68	3006.14	5.37
69	3002.14	1.37
70	3003.63	2.85
71	3004.93	4.15

MAX W = 6.18 mm

RAIO MEDIO DA SECCAO = 3002.34

RAIO PARA OTIMIZACAO = 3000.78

CENTRO DE REFERENCIA : CENTRO GEOM. DOS

72 PONTOS NA CAVERNA

( 2.70 )

COORDENADAS DO CENTRO : CX = 2.76 Y =



FALTA DE CIRCULARIDADE W -BO-B1 COSC THETA-D1 SENC THETA

ANGULO

VALOR MAXIMO DOS W' (CS) = 7.02 mm

27	-	130.0	-0.65
28	-	135.0	-2.68
29	-	140.0	-2.23
30	-	145.0	-2.02
31	-	150.0	-0.07
32	-	155.0	1.72
33	-	160.0	2.52
34	-	165.0	3.07
35	-	170.0	4.41
36	-	175.0	4.94
37	-	180.0	3.58
38	-	185.0	3.51
39	-	190.0	2.15
40	-	195.0	0.04
41	-	200.0	-2.17
42	-	205.0	-3.65
43	-	210.0	-4.74
44	-	215.0	-4.04
45	-	220.0	-4.15
46	-	225.0	-6.22
47	-	230.0	-3.79
48	-	235.0	-2.90
49	-	240.0	-2.85
50	-	245.0	-0.11
51	-	250.0	2.72
52	-	255.0	2.45
53	-	260.0	3.07
54	-	265.0	4.62
55	-	270.0	4.92
56	-	275.0	6.25
57	-	280.0	5.52
58	-	285.0	2.30
59	-	290.0	2.29
60	-	295.0	0.79
61	-	300.0	-3.00
62	-	305.0	-1.78
63	-	310.0	-3.68
64	-	315.0	-6.59
65	-	320.0	-7.02
66	-	325.0	-3.63
67	-	330.0	-4.86
68	-	335.0	-0.11
69	-	340.0	3.94
70	-	345.0	-0.21
71	-	350.0	1.12
72	-	355.0	2.27



Tabela B.5 - Processamento do programa CIRSUDO para os

valores dos off-sets totais para a configuração C<sup>1</sup>

(segunda medição dos raios).

f1 1/2

PTO	RAIO	DESVIO
0	3006.05	5.21
1	3006.79	5.95
2	3006.89	6.05
3	3006.26	5.43
4	3004.94	4.10
5	3004.43	3.59
6	3003.19	2.35
7	3002.46	1.63
8	3001.79	0.95
9	3001.19	0.35
10	3000.24	-0.60
11	3000.78	-0.05
12	3002.01	1.17
13	3003.67	2.83
14	3003.74	2.90
15	3004.93	4.10
16	3005.85	5.01
17	3005.84	5.00
18	3006.21	5.37
19	3005.46	4.62
20	3005.39	4.55
21	3004.57	3.74
22	3003.59	2.76
23	3002.03	1.19
24	3001.85	1.01
25	3002.38	1.54
26	3002.78	1.95
27	3000.60	-0.24
28	3000.93	0.09
29	3000.99	0.15
30	3002.80	1.96
31	3004.44	3.60
32	3005.08	4.24
33	3005.51	4.67
34	3006.68	5.85
35	3007.04	6.20
36	3005.54	4.70
37	3005.31	4.47
38	3003.82	2.98
39	3001.55	0.71
40	2999.22	-1.62
41	2997.61	-3.23
42	2996.38	-4.46
43	2996.98	-3.86
44	2996.79	-4.05
45	2994.63	-6.20

PTO	RAIO	DESVIO
46	2997.00	-3.84
47	2997.82	-3.02
48	2997.81	-3.03
49	3000.54	-0.30
50	3003.37	2.53
51	3003.12	2.28
52	3003.73	2.90
53	3005.32	4.48
54	3005.63	4.79
55	3007.04	6.20
56	3006.37	5.54
57	3003.23	2.39
58	3003.28	2.44
59	3001.87	1.03
60	2998.19	-2.65
61	2999.49	-1.35
62	2997.75	-3.09
63	2994.93	-5.91
64	2994.63	-6.20
65	2998.18	-2.66
66	2997.06	-3.78
67	3001.98	1.14
68	3006.18	5.35
69	3002.19	1.36
70	3003.66	2.82
71	3004.95	4.11

MAX w = 6.20 mm

RAIO MEDIO DA SECCAO = 3002.40

RAIO PARA OTIMIZACAO = 3000.84

CENTRO DE REFERENCIA : CENTRO GEOM. DOS

72 PONTOS NA CAVERNHA

COORDENADAS DO CENTRO : (X = 2.74 Y = 2.74 )

Tabela B.6 - Processamento do programa ESCOAMEN para os valores dos off-sets totais para a configuração C<sub>1</sub> (segunda medição dos raios).

f1 1/2

DECOMPOSICAO EM SERIE DE FOURIER

$$W = B \cdot \cos(N \cdot \theta) + D \cdot \sin(N \cdot \theta)$$

N =	B =	D =
0	1.56	0.00
1	0.44	1.70
2	-0.02	-0.32
3	0.01	1.76
4	3.78	-0.15
5	0.02	-0.02
6	0.08	-0.23
7	-0.50	-0.05
8	-0.17	-0.14
9	-0.20	0.14
10	-0.16	0.13

FALTA DE CIRCULARIDADE  
W - B0-B1 COS(THETA) - D1 SEN(THETA)

ANGULO	W	D
1	0.0	3.22
2	5.0	3.81
3	10.0	3.77
4	15.0	3.01
5	20.0	1.55
6	25.0	0.92
7	30.0	-0.44
8	35.0	-1.26
9	40.0	-2.03
10	45.0	-2.72
11	50.0	-3.74
12	55.0	-3.25
13	60.0	-2.08
14	65.0	-0.45
15	70.0	-0.40
16	75.0	0.78
17	80.0	1.70
18	85.0	1.72
19	90.0	2.12
20	95.0	1.41
21	100.0	1.40
22	105.0	0.65
23	110.0	-0.25
24	115.0	-1.72
25	120.0	-1.80
26	125.0	-1.16

FALTA DE CIRCULARIDADE  
W -BO-B1 COSC THETA-D1 SENC THETA

VALOR MAXIMO DOS W' (S) = 7.00 mm

27	-	130.0	-0.63
28	-	135.0	-2.69
29	-	140.0	-2.22
30	-	145.0	-2.03
31	-	150.0	-0.07
32	-	155.0	1.72
33	-	160.0	2.51
34	-	165.0	3.09
35	-	170.0	4.42
36	-	175.0	4.93
37	-	180.0	3.58
38	-	185.0	3.50
39	-	190.0	2.14
40	-	195.0	0.01
41	-	200.0	-2.18
42	-	205.0	-3.67
43	-	210.0	-4.79
44	-	215.0	-4.09
45	-	220.0	-4.18
46	-	225.0	-6.25
47	-	230.0	-3.82
48	-	235.0	-2.94
49	-	240.0	-2.89
50	-	245.0	-0.13
51	-	250.0	2.72
52	-	255.0	2.47
53	-	260.0	3.09
54	-	265.0	4.65
55	-	270.0	4.93
56	-	275.0	6.30
57	-	280.0	5.57
58	-	285.0	2.36
59	-	290.0	2.33
60	-	295.0	0.83
61	-	300.0	-2.96
62	-	305.0	-1.77
63	-	310.0	-3.63
64	-	315.0	-6.57
65	-	320.0	-7.00
66	-	325.0	-3.60
67	-	330.0	-4.87
68	-	335.0	-0.10
69	-	340.0	3.96
70	-	345.0	-0.18
71	-	350.0	1.13
72	-	355.0	2.27

ANGULO

Tabela B.7 - Processamento do programa CIRSUBDO para os valores dos off-sets totais para a configuração C<sub>2</sub> (primeira medição dos raios).

f1 1/2

PTO	RAIO	DESVIO
0	3005.68	4.59
1	3006.95	5.86
2	3006.55	5.45
3	3005.11	4.02
4	3003.22	2.13
5	3002.34	1.25
6	3000.70	-0.39
7	3000.29	-0.80
8	3000.12	-0.97
9	3000.05	-1.04
10	2999.66	-1.43
11	3001.34	0.25
12	3003.27	2.17
13	3004.92	3.83
14	3004.72	3.62
15	3005.48	4.39
16	3005.46	4.37
17	3003.98	2.89
18	3003.32	2.23
19	3002.28	1.19
20	3001.62	0.53
21	3001.06	-0.03
22	3002.19	1.10
23	3002.55	1.46
24	3002.95	1.86
25	3004.21	3.12
26	3006.12	5.02
27	3005.68	4.59
28	3006.27	5.18
29	3004.42	3.33
30	3004.46	3.37
31	3005.18	4.09
32	3002.51	1.42
33	2999.39	-1.70
34	3000.25	-0.84
35	3000.01	-1.08
36	2997.97	-3.12
37	3001.08	-0.01
38	3003.60	2.51
39	3002.26	1.17
40	3000.44	-0.65
41	3003.09	2.00
42	3006.44	5.34
43	3007.17	6.08
44	3006.16	5.06
45	3003.78	2.69



PTO

RAIO

DESVIO

46	3007.17	6.08
47	2999.52	-1.58
48	2997.03	-4.06
49	2998.79	-2.30
50	2997.74	-3.35
51	2995.01	-6.08
52	2999.16	-1.93
53	3001.86	0.77
54	3000.46	-0.63
55	3003.40	2.30
56	3007.17	6.08
57	3006.08	4.99
58	3005.65	4.55
59	3005.82	4.73
60	3004.38	3.29
61	3003.94	2.85
62	3001.08	-0.01
63	2997.83	-3.26
64	2996.40	-4.69
65	2995.01	-6.08
66	2995.94	-5.15
67	3001.10	0.01
68	3003.23	2.14
69	3000.70	-0.39
70	3002.40	1.31
71	3004.03	2.94

MAX W

= 6.08 mm

RAIO MEDIO DA SECCAO = 3002.46  
RAIO PARA OTIMIZACAO = 3001.09

CENTRO DE REFERENCIA : CENTRO GEOM. DOS 72 PONTOS NA CAVERNA

COORDENADAS DO CENTRO : CX = 3.58 Y = 3.13 C

Tabela B.8 - Processamento do programa ESCOAMEN para os valores dos off-sets totais para a configuração  $C_2$  (primeira medição dos raios).

f1 1/2

DECOMPOSICAO EM SERIE DE FOURIER

$$W = B \cdot \cos C N \cdot \text{TETA} + D \cdot \text{SINC} N \cdot \text{TETA}$$

N =	B =	D =
0	1.37	0.00
1	-0.28	0.85
2	-0.08	-0.08
3	0.31	0.19
4	0.22	1.42
5	3.51	0.13
6	0.15	-0.20
7	-0.44	0.08
8	0.05	-0.10
9	-0.39	-0.21
10	-0.13	0.47

ANGULO

FALTA DE CIRCULARIDADE  
W - B0-B1 COS C THETA - D1 SINC THETA

1 -	0.0	3.50
2 -	5.0	4.69
3 -	10.0	4.21
4 -	15.0	2.70
5 -	20.0	0.73
6 -	25.0	-0.23
7 -	30.0	-1.94
8 -	35.0	-2.44
9 -	40.0	-2.67
10 -	45.0	-2.82
11 -	50.0	-3.28
12 -	55.0	-1.66
13 -	60.0	0.20
14 -	65.0	1.81
15 -	70.0	1.55
16 -	75.0	2.27
17 -	80.0	2.21
18 -	85.0	0.69
19 -	90.0	0.01
20 -	95.0	-1.06
21 -	100.0	-1.73
22 -	105.0	-2.29
23 -	110.0	-1.17
24 -	115.0	-0.80
25 -	120.0	-0.39
26 -	125.0	0.89

FALTA DE CIRCULARIDADE  
W -BO-B1 COS(THETA)-DI SEN(THETA)

ANGULO

VALOR MAXIMO DOS W' (CS) = 6.73 mm

27	130.0	2.82
28	135.0	2.42
29	140.0	3.05
30	145.0	1.24
31	150.0	1.33
32	155.0	2.11
33	160.0	-0.51
34	165.0	-3.56
35	170.0	-2.63
36	175.0	-2.81
37	180.0	-4.77
38	185.0	-1.58
39	190.0	1.01
40	195.0	-0.25
41	200.0	-1.99
42	205.0	0.74
43	210.0	4.16
44	215.0	4.97
45	220.0	4.03
46	225.0	1.73
47	230.0	5.19
48	235.0	-2.41
49	240.0	-4.83
50	245.0	-3.02
51	250.0	-4.01
52	255.0	-6.70
53	260.0	-2.51
54	265.0	0.23
55	270.0	-1.15
56	275.0	1.81
57	280.0	5.60
58	285.0	4.52
59	290.0	4.08
60	295.0	4.25
61	300.0	2.80
62	305.0	2.34
63	310.0	-0.55
64	315.0	-3.83
65	320.0	-5.29
66	325.0	-5.73
67	330.0	-5.85
68	335.0	-0.74
69	340.0	1.32
70	345.0	-1.27
71	350.0	0.37
72	355.0	1.92

Tabela B.9 - Processamento do programa CIRSUBDO para os valores dos off-sets totais para a configuração C<sup>2</sup> (segunda medição dos raios).

f1 1/2

PTO	RAIO	DESVIO
0	3005.56	4.54
1	3006.79	5.77
2	3006.47	5.46
3	3005.05	4.03
4	3003.17	2.16
5	3002.32	1.30
6	3000.69	-0.33
7	3000.29	-0.73
8	3000.19	-0.83
9	3000.11	-0.91
10	2999.75	-1.26
11	3001.44	0.42
12	3003.36	2.34
13	3005.03	4.01
14	3004.81	3.79
15	3005.62	4.61
16	3005.61	4.59
17	3004.14	3.12
18	3003.49	2.48
19	3002.43	1.42
20	3001.81	0.79
21	3001.25	0.23
22	3002.32	1.31
23	3002.71	1.70
24	3003.10	2.08
25	3004.35	3.33
26	3006.27	5.26
27	3005.81	4.79
28	3006.41	5.39
29	3004.52	3.50
30	3004.57	3.56
31	3005.29	4.27
32	3002.60	1.59
33	2999.51	-1.51
34	3000.35	-0.67
35	3000.08	-0.94
36	2998.04	-2.98
37	3001.12	0.10
38	3003.63	2.61
39	3002.26	1.25
40	3000.44	-0.58
41	3003.07	2.05
42	3006.38	5.36
43	3007.10	6.09
44	3006.09	5.08
45	3003.71	2.69

MAX W = 6.09 mm  
 RAI0 MEDIO DA SECCAO = 3002.42  
 RAI0 PARA OTIMIZACAO = 3001.01  
 CENTRO DE REFERENCIA : CENTRO GEOM. DOS 72 PONTOS NA CAVERNA  
 COORDENADAS DO CENTRO : ( X = 3.46 Y = 3.19 )

PTO	RAIO	DESVIO
46	3007.09	6.07
47	2999.41	-1.60
48	2996.91	-4.11
49	2998.68	-2.33
50	2997.65	-3.37
51	2994.93	-6.09
52	2999.07	-1.95
53	3001.38	0.36
54	3000.35	-0.67
55	3003.32	2.30
56	3007.11	6.09
57	3006.01	4.99
58	3005.55	4.54
59	3005.73	4.72
60	3004.29	3.27
61	3003.82	2.80
62	3001.02	-0.00
63	2997.73	-3.29
64	2996.31	-4.71
65	2994.93	-6.09
66	2995.83	-5.18
67	3001.03	0.01
68	3003.16	2.15
69	3000.65	-0.37
70	3002.35	1.33
71	3003.97	2.95



Tabela B.10 - Processamento do programa ESCOAMEN para os valores dos off-sets totais para a configuração  $C^2$  (segunda medição dos raios).

f1 1/2

DECOMPOSIÇÃO EM SÉRIE DE FOURIER

$$W = B \cdot \cos(N \cdot \theta) + D \cdot \sin(N \cdot \theta)$$

N	B	D
0	1.45	D =
1	-0.33	D =
2	-0.09	D =
3	0.29	D =
4	0.21	D =
5	3.51	D =
6	0.15	D =
7	-0.44	D =
8	0.04	D =
9	-0.39	D =
10	-0.12	D =

FALTA DE CIRCULARIDADE  
W - B0-B1 COS(THETA) - D1 SEN(THETA)

ANGULO	B	D
1	0.0	3.42
2	5.0	4.57
3	10.0	4.16
4	15.0	2.65
5	20.0	0.68
6	25.0	-0.26
7	30.0	-1.98
8	35.0	-2.47
9	40.0	-2.66
10	45.0	-2.82
11	50.0	-3.26
12	55.0	-1.65
13	60.0	0.21
14	65.0	1.81
15	70.0	1.53
16	75.0	2.29
17	80.0	2.23
18	85.0	0.72
19	90.0	0.04
20	95.0	-1.05
21	100.0	-1.69
22	105.0	-2.26
23	110.0	-1.19
24	115.0	-0.79
25	120.0	-0.39
26	125.0	0.88
27	130.0	2.84
28	135.0	2.41

FALTA DE CIRCULARIDADE W -BO-B1 COSC THETA-D1 SENC THETA

VALOR MAXIMO DOS W' (S) = 6.70 mm

29	-	140.0	3.06
30	-	145.0	1.22
31	-	150.0	1.33
32	-	155.0	2.11
33	-	160.0	-0.51
34	-	165.0	-3.53
35	-	170.0	-2.61
36	-	175.0	-2.80
37	-	180.0	-4.76
38	-	185.0	-1.59
39	-	190.0	1.01
40	-	195.0	-0.26
41	-	200.0	-2.00
42	-	205.0	0.73
43	-	210.0	4.12
44	-	215.0	4.94
45	-	220.0	4.01
46	-	225.0	1.71
47	-	230.0	5.17
48	-	235.0	-2.43
49	-	240.0	-4.86
50	-	245.0	-3.02
51	-	250.0	-3.99
52	-	255.0	-6.67
53	-	260.0	-2.47
54	-	265.0	-0.13
55	-	270.0	-1.12
56	-	275.0	1.87
57	-	280.0	5.68
58	-	285.0	4.59
59	-	290.0	4.13
60	-	295.0	4.31
61	-	300.0	2.85
62	-	305.0	2.36
63	-	310.0	-0.48
64	-	315.0	-3.80
65	-	320.0	-5.27
66	-	325.0	-6.70
67	-	330.0	-5.85
68	-	335.0	-0.72
69	-	340.0	1.35
70	-	345.0	-1.24
71	-	350.0	0.38
72	-	355.0	1.92

ANGULO

PROCESSAMENTO DOS DADOS DE FALTA DE CIRCULARIDADE DO  
PROCESSO DE QUALIFICAÇÃO DA RÉGUA EM ARCO ANALÓGICA

APÊNDICE C

Tabela C.1 - Processamento do programa CIRSUBDO para os valores dos off-sets totais para a configuração C<sup>2</sup> (primeira medição dos raios).

f1 1/2

PTO	RAIO	DESVIO
0	3110.38	4.06
1	3110.77	4.44
2	3110.54	4.21
3	3110.23	3.91
4	3107.47	1.15
5	3106.77	0.45
6	3104.85	-1.47
7	3106.24	-0.09
8	3106.23	-0.09
9	3109.17	2.84
10	3109.04	2.72
11	3112.52	6.20
12	3110.57	4.25
13	3111.29	4.97
14	3108.96	2.64
15	3109.29	2.96
16	3106.32	-0.00
17	3109.26	2.93
18	3105.17	-1.16
19	3104.55	-1.77
20	3107.51	1.18
21	3111.64	5.32
22	3110.16	3.83
23	3108.60	2.28
24	3110.42	4.09
25	3109.87	3.55
26	3106.48	0.16
27	3100.45	-5.88
28	3101.31	-5.02
29	3103.30	-3.03
30	3099.58	-6.75
31	3104.53	-1.79
32	3102.70	-3.63
33	3107.11	0.79
34	3107.97	1.64
35	3111.61	5.29
36	3110.53	4.20
37	3113.07	6.75
38	3108.05	1.73
39	3106.06	-0.27
40	3102.92	-3.40
41	3102.91	-3.42
42	3099.58	-6.75
43	3101.50	-4.82

MAX w = 6.75 mm  
 RAO MEDIO DA SECCAO = 3107.20  
 RAO PARA OTIMIZACAO = 3106.33  
 CENTRO DE REFERENCIA : CENTRO GEOM. DOS 48 PONTOS NA CAVERNA  
 COORDENADAS DO CENTRO : CX = 3.01 Y = 2.99

PTO	RAIO	DESVIO
44	3101.61	-4.72
45	3106.86	0.54
46	3106.56	0.23
47	3113.07	6.75



Tabela C.2 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da primeira medição de raios, e da medição dos off-sets para a configuração  $C_2$ . (componentes da série de Fourier)

FI 1/2

DECOMPOSICAO EM SERIE DE FOURIER

$$W = B \cdot \text{COSCN} \cdot \text{TETA} + D \cdot \text{SENCN} \cdot \text{TETA}$$

N	B =	D =
N = 0	B = 0.87	D = 0.00
N = 1	B = 0.33	D = 1.80
N = 2	B = -0.42	D = -0.14
N = 3	B = 0.47	D = 1.82
N = 4	B = 3.89	D = -0.26
N = 5	B = 0.14	D = 0.00
N = 6	B = 0.09	D = -0.29
N = 7	B = -0.35	D = 0.12
N = 8	B = 0.13	D = -0.21
N = 9	B = 0.08	D = -0.38
N = 10	B = -0.27	D = 0.19

ANGULO FALTA DE CIRCULARIDADE W - B0 - B1 COSC THETA - D1 SENC THETA

1 -	0.0	2.86
2 -	7.5	3.01
3 -	15.0	2.55
4 -	22.5	2.04
5 -	30.0	-0.91
6 -	37.5	-1.79
7 -	45.0	-3.85
8 -	52.5	-2.59
9 -	60.0	-2.69
10 -	67.5	0.18
11 -	75.0	0.02
12 -	82.5	3.49
13 -	90.0	1.58
14 -	97.5	2.35
15 -	105.0	0.11
16 -	112.5	0.55
17 -	120.0	-2.27
18 -	127.5	0.83
19 -	135.0	-3.07
20 -	142.5	-3.48
21 -	150.0	-0.31
22 -	157.5	4.06
23 -	165.0	2.81

FALTA DE CIRCULARIDADE W1-B0-B1 COSC THETA D-D1 SENC THETA D

ANGULO

VALOR MAXIMO DOS W' (S) = 7.61 mm

24	-	172.5	1.49
25	-	180.0	3.55
26	-	187.5	3.24
27	-	195.0	0.07
28	-	202.5	-5.76
29	-	210.0	-4.71
30	-	217.5	-2.54
31	-	225.0	-6.12
32	-	232.5	-1.04
33	-	240.0	-2.78
34	-	247.5	1.70
35	-	255.0	2.59
36	-	262.5	6.24
37	-	270.0	5.13
38	-	277.5	7.61
39	-	285.0	2.51
40	-	292.5	0.39
41	-	300.0	-2.88
42	-	307.5	-3.06
43	-	315.0	-6.58
44	-	322.5	-4.86
45	-	330.0	-4.98
46	-	337.5	0.05
47	-	345.0	-0.50
48	-	352.5	5.78

Tabela C.3 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da segunda medição de raios, e da medição dos off-sets para a configuração C<sup>2</sup>. (Otimização do centro e raio)

f1 1/2

PTO	RAIO	DESVIO
0	3110.48	4.10
1	3110.88	4.50
2	3110.58	4.19
3	3110.25	3.87
4	3107.47	1.08
5	3106.74	0.35
6	3104.78	-1.60
7	3106.14	-0.25
8	3106.14	-0.24
9	3109.08	2.69
10	3108.91	2.53
11	3112.39	6.01
12	3110.42	4.04
13	3111.16	4.77
14	3108.81	2.42
15	3109.18	2.80
16	3106.20	-0.18
17	3109.14	2.75
18	3105.07	-1.32
19	3104.45	-1.93
20	3107.43	1.04
21	3111.57	5.19
22	3110.07	3.69
23	3108.56	2.17
24	3110.38	3.99
25	3109.87	3.48
26	3106.50	0.12
27	3100.49	-5.90
28	3101.38	-5.01
29	3103.37	-3.01
30	3099.66	-6.73
31	3104.62	-1.76
32	3102.82	-3.57
33	3107.20	0.82
34	3108.04	1.65
35	3111.69	5.30
36	3110.62	4.23
37	3113.12	6.73
38	3108.10	1.71
39	3106.13	-0.26
40	3102.98	-3.40
41	3102.99	-3.40
42	3099.66	-6.73
43	3101.55	-4.83

MAX w = 6.73 mm  
 RAI0 MEDIO DA SECCAO = 3107.19  
 RAI0 PARA OTIMIZACAO = 3106.39  
 CENTRO DE REFERENCIA : CENTRO GEOM. DOS 48 PONTOS NA CAVERNA  
 COORDENADAS DO CENTRO : ( X = 3.12 Y = 2.96 )

PTO	RAIO	DESVIO
44	3101.68	-4.71
45	3106.89	0.51
46	3106.57	0.19
47	3113.12	6.73

f1 2/2

Tabela C.4 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da segunda medição de raios, e da medição dos off-sets para a configuração  $C^2$ . (componentes da série de Fourier)

f1 1/2

DECOMPOSICAO EM SERIE DE FOURIER

$$W = B \cdot \cos(N \cdot \theta) + D \cdot \sin(N \cdot \theta)$$

N =	B =	D =
0	0.81	D =
1	0.36	D =
2	-0.40	D =
3	0.49	D =
4	3.88	D =
5	0.15	D =
6	0.10	D =
7	-0.34	D =
8	0.14	D =
9	0.08	D =
10	-0.26	D =

ANGULO FALTA DE CIRCULARIDADE  
W - B0-B1 COS(THETA) - D1 SEN(THETA)

1 -	0.0	2.93
2 -	7.5	3.11
3 -	15.0	2.60
4 -	22.5	2.08
5 -	30.0	-0.88
6 -	37.5	-1.77
7 -	45.0	-3.86
8 -	52.5	-2.62
9 -	60.0	-2.70
10 -	67.5	0.18
11 -	75.0	-0.01
12 -	82.5	3.47
13 -	90.0	1.54
14 -	97.5	2.33
15 -	105.0	0.07
16 -	112.5	0.56
17 -	120.0	-2.28
18 -	127.5	0.82
19 -	135.0	-3.07
20 -	142.5	-3.49
21 -	150.0	-0.31
22 -	157.5	4.06
23 -	165.0	2.78



FALTA DE CIRCULARIDADE W -BO-B1 COSC THETA-D1 SENC THETA

ANGULO

ANGULO	VALOR MAXIMO DOS W' (S) = 7.55 mm
24	172.5
25	180.0
26	187.5
27	195.0
28	202.5
29	210.0
30	217.5
31	225.0
32	232.5
33	240.0
34	247.5
35	255.0
36	262.5
37	270.0
38	277.5
39	285.0
40	292.5
41	300.0
42	307.5
43	315.0
44	322.5
45	330.0
46	337.5
47	345.0
48	352.5
24	1.49
25	3.54
26	3.25
27	0.09
28	-5.73
29	-4.66
30	-2.51
31	-6.09
32	-1.01
33	-2.73
34	1.71
35	2.57
36	5.22
37	5.12
38	7.55
39	2.45
40	0.36
41	-2.92
42	-3.08
43	-6.59
44	-4.89
45	-4.98
46	0.02
47	-0.53
48	5.79

PROCESSAMENTO DOS DADOS DE FALTA DE CIRCULARIDADE DO  
PROCESSO DE QUALIFICAÇÃO DA RÉGUA EM ARCO DIGITAL

APÊNDICE D

Tabela D.1 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da primeira medição de raios, e da medição dos off-sets para a configuração C<sup>2</sup>. (otimização do centro e raio)

f1 1/2

PTO	RAIO	DESVIO
0	3110.47	4.03
1	3110.88	4.43
2	3110.57	4.12
3	3110.28	3.84
4	3107.40	0.95
5	3106.72	0.28
6	3105.18	-1.27
7	3106.09	-0.35
8	3106.07	-0.38
9	3108.89	2.44
10	3108.85	2.41
11	3112.32	5.87
12	3110.36	3.92
13	3111.03	4.58
14	3108.65	2.20
15	3108.93	2.49
16	3106.12	-0.32
17	3109.12	2.67
18	3104.89	-1.55
19	3104.45	-2.00
20	3107.37	0.93
21	3111.68	5.23
22	3110.17	3.73
23	3108.59	2.14
24	3110.38	3.94
25	3110.07	3.62
26	3106.50	0.06
27	3100.55	-5.90
28	3101.43	-5.01
29	3103.50	-2.94
30	3099.75	-6.69
31	3104.68	-1.76
32	3102.86	-3.58
33	3107.24	0.80
34	3108.16	1.72
35	3112.02	5.57
36	3110.74	4.29
37	3113.14	6.69
38	3108.27	1.82
39	3106.17	-0.28
40	3103.07	-3.37
41	3103.10	-3.34
42	3099.75	-6.69
43	3101.76	-4.68

MAX w = 6.69 mm  
 RAI0 MEDIO DA SECCAO = 3107.22  
 RAI0 PARA OTIMIZACAO = 3106.44  
 CENTRO DE REFERENCIA : CENTRO GEOM. DOS 48 PONTOS NA CAVERNA  
 COORDENADAS DO CENTRO : ( X = 3.22 Y = 2.95 )

PTO	RAIO	DESVIO
44	3101.75	-4.70
45	3107.08	0.63
46	3106.64	0.20
47	3113.14	6.69

f1 2/2

Tabela D.2 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da primeira medição de raios, e da medição dos off-sets para a configuração  $C_z$  (componentes da série de Fourier)

f1 1/2

DECOMPOSICAO EM SERIE DE FOURIER

$$W = B \cdot \text{COSC}(N \cdot \text{TETA}) + D \cdot \text{SENC}(N \cdot \text{TETA})$$

N =	B =	D =
0	0.72	0.00
1	0.39	1.48
2	-0.36	-0.08
3	0.47	1.85
4	3.88	-0.26
5	0.14	0.00
6	0.09	-0.29
7	-0.33	0.11
8	0.15	-0.23
9	0.08	-0.36
10	-0.28	0.24

ANGULO

FALTA DE CIRCULARIDADE  
W - B0 - B1 COSC THETA - D1 SENC THETA

1 -	0.0	2.96
2 -	7.5	3.14
3 -	15.0	2.63
4 -	22.5	2.16
5 -	30.0	-0.90
6 -	37.5	-1.74
7 -	45.0	-3.43
8 -	52.5	-2.64
9 -	60.0	-2.72
10 -	67.5	0.06
11 -	75.0	-0.03
12 -	82.5	3.46
13 -	90.0	1.52
14 -	97.5	2.26
15 -	105.0	-0.05
16 -	112.5	0.39
17 -	120.0	-2.30
18 -	127.5	0.85
19 -	135.0	-3.19
20 -	142.5	-3.47
21 -	150.0	-0.33
22 -	157.5	4.18
23 -	165.0	2.86



FALTA DE CIRCULARIDADE W -BO-B1 COSC THETA) -D1 SENC THETA)

VALOR MAXIMO DOS W' (CS) = 7.37

24	-	172.5	1.52
25	-	180.0	3.51
26	-	187.5	3.42
27	-	195.0	0.06
28	-	202.5	-5.71
29	-	210.0	-4.64
30	-	217.5	-2.44
31	-	225.0	-6.07
32	-	232.5	-1.04
33	-	240.0	-2.77
34	-	247.5	1.72
35	-	255.0	2.54
36	-	262.5	6.38
37	-	270.0	5.08
38	-	277.5	7.37
39	-	285.0	2.41
40	-	292.5	0.43
41	-	300.0	-3.00
42	-	307.5	-3.11
43	-	315.0	-6.62
44	-	322.5	-5.02
45	-	330.0	-5.00
46	-	337.5	0.09
47	-	345.0	-0.55
48	-	352.5	5.77

ANGULO

Tabela D.3 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da segunda medição de raios, e da medição dos off-sets para a configuração C<sup>2</sup>. (otimização do centro e raio)

f1 1/2

PTO	RAIO	DESVIO
0	3110.57	4.07
1	3110.94	4.44
2	3110.61	4.10
3	3110.31	3.80
4	3107.40	0.89
5	3106.69	0.18
6	3105.11	-1.39
7	3105.99	-0.51
8	3105.98	-0.53
9	3108.80	2.29
10	3108.72	2.22
11	3112.19	5.69
12	3110.21	3.71
13	3110.90	4.39
14	3108.50	1.99
15	3108.83	2.32
16	3106.00	-0.50
17	3109.00	2.50
18	3104.80	-1.71
19	3104.35	-2.16
20	3107.29	0.79
21	3111.61	5.11
22	3110.08	3.58
23	3108.55	2.04
24	3110.34	3.84
25	3110.06	3.56
26	3106.52	0.02
27	3100.58	-5.92
28	3101.50	-5.00
29	3103.57	-2.93
30	3099.83	-6.68
31	3104.77	-1.74
32	3102.98	-3.52
33	3107.43	0.93
34	3108.23	1.73
35	3112.09	5.59
36	3110.83	4.32
37	3113.18	6.67
38	3108.31	1.81
39	3106.44	-0.07
40	3103.13	-3.37
41	3103.17	-3.33
42	3099.83	-6.67
43	3101.61	-4.89

MAX w = 6.68 mm  
 RAI0 MEDIO DA SECCAO = 3107.22  
 RAI0 PARA OTIMIZACAO = 3106.50  
 CENTRO DE REFERENCIA : CENTRO GEOM. DOS 48 PONTOS NA CAVERNA  
 COORDENADAS DO CENTRO : ( X = 3.33 Y = 2.92 )

PTO	RAIO	DESVIO
44	3101.82	-4.69
45	3107.11	0.60
46	3106.66	0.16
47	3113.18	6.68

Tabela D.4 - Processamento do programa CIRSUBRO para os valores de espessura, da segunda medição de raios, e da medição dos off-sets para a configuração C<sup>2</sup>. (componentes da série de Fourier)

f1 1/2

DECOMPOSICAO EM SERIE DE FOURIER

$$W = B \cdot \cos(N \cdot \text{TETA}) + D \cdot \sin(N \cdot \text{TETA})$$

N	B	D
0	0.78	0.00
1	0.37	1.59
2	-0.37	-0.11
3	0.46	1.84
4	3.87	-0.27
5	0.12	-0.01
6	0.07	-0.29
7	-0.33	0.12
8	0.17	-0.22
9	0.09	-0.36
10	-0.28	0.24

ANGULO FALTA DE CIRCULARIDADE  
 $W = B_0 - B_1 \cos(\text{TETA}) - D_1 \sin(\text{TETA})$

N	B	D
1	0.0	2.88
2	7.5	3.08
3	15.0	2.58
4	22.5	2.11
5	30.0	-0.94
6	37.5	-1.76
7	45.0	-3.43
8	52.5	-2.62
9	60.0	-2.72
10	67.5	0.06
11	75.0	-0.00
12	82.5	3.47
13	90.0	1.55
14	97.5	2.28
15	105.0	-0.02
16	112.5	0.38
17	120.0	-2.29
18	127.5	0.86
19	135.0	-3.19
20	142.5	-3.45
21	150.0	-0.33
22	157.5	4.19
23	165.0	2.89

FALTA DE CIRCULARIDADE W - B0-B1 COSC THETA D - D1 SENC THETA D

VALOR MAXIMO DOS W (CS) = 7.44

1.52	172.5	24
3.53	180.0	25
3.41	187.5	26
0.05	195.0	27
-5.73	202.5	28
-4.68	210.0	29
-2.47	217.5	30
-6.09	225.0	31
-1.06	232.5	32
-2.80	240.0	33
1.62	247.5	34
2.57	255.0	35
6.41	262.5	36
5.10	270.0	37
7.44	277.5	38
2.48	285.0	39
0.27	292.5	40
-2.96	300.0	41
-3.09	307.5	42
-6.61	315.0	43
-4.79	322.5	44
-5.00	330.0	45
0.12	337.5	46
-0.53	345.0	47
5.75	352.5	48

ANGULO



ANEXO 1



. 7846456915 . 866814494  
24 2  
. 7657415717 . 885482579  
25 3  
. 9063882231 . 766006693  
26 3  
. 8952003717 . 797931603  
27 3  
. 8834386467 . 817711661  
28 3  
. 8711329102 . 839817285